

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS
ARXIU DE LES SECCIONS DE CIÈNCIES, CXII
SECCIÓ DE CIÈNCIES I TECNOLOGIA

DAVID JOU I MIRABENT

MATÈRIA I MATERIALISME

BARCELONA

1997

MATÈRIA I MATERIALISME

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS

ARXIU DE LES SECCIONS DE CIÈNCIES, CXII

SECCIÓ DE CIÈNCIES I TECNOLOGIA

DAVID JOU I MIRABENT

MATÈRIA I MATERIALISME

BARCELONA

1997

Biblioteca de Catalunya. Dades CIP:

Jou, David, 1953–
Matèria i materialisme
Bibliografia
ISBN 84-7283-345-3
I. Institut d'Estudis Catalans II. Títol
III. Col·lecció 1. Matèria 2. Materialisme
117

© David Jou i Mirabent

© 1997, Institut d'Estudis Catalans, per a la present edició

Editat per l'Institut d'Estudis Catalans
Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: desembre de 1996
Tiratge: 600 exemplars

Compost i imprès per Amador Viñolas
Imprès per ATM Producció SL
Sardenya, 385-387. 08025 Barcelona

ISBN: 84-7283-345-3
Dipòsit Legal: B - 15315/97

SUMARI

INTRODUCCIÓ	7
1. LA MATÈRIA ELEMENTAL. L'ESTRUCTURA DE LA MATÈRIA	9
1.1. L'atomisme filosòfic	9
1.2. L'atomisme científic	12
1.3. Les partícules elementals: quarks i leptons	16
1.4. Les interaccions	19
1.5. Més enllà del model estàndard	22
1.6. El buit	23
1.7. La teoria quàntica i la realitat	26
1.8. Conclusions	28
2. LA MATÈRIA COSMOLÒGICA. L'ORIGEN DE LA MATÈRIA	31
2.1. Introducció: Déu i matèria	31
2.2. L'edat de l'Univers i l'inici de la matèria	35
2.3. L'origen de la matèria	36
2.4. Matèria/antimatèria	41
2.5. Matèria fosca	42
2.6. Les condicions d'existència dels àtoms pesants	44
2.7. Passat i futur de l'Univers	45
2.8. Conclusions	47
3. LA MATÈRIA TECNOLÒGICA. L'ÚS DE LA MATÈRIA	49
3.1. Matèria, forma, energia	49
3.2. Entropia: degradació, informació, diversitat	54
3.3. Perspectives sobre matèria, tecnologia i canvi cultural	61
3.4. Conclusions	71

This One



4AWE-014-R9A4

4. LA MATÈRIA VIVA. ORIGEN DE LA VIDA; MENT I MATÈRIA	73
4.1. Vida, ment, matèria	73
4.2. L'origen de la vida	79
4.3. Neurobiologia: ment i matèria	87
4.4. Conclusions	98
5. CONCLUSIONS GENERALS	101
6. BIBLIOGRAFIA	105
6.1. Bibliografia general	105
6.2. Obres científiques de l'autor	107

INTRODUCCIÓ

La ciència dedica una bona part del seu esforç a estudiar les propietats de la matèria. Cada moment històric té plantejades certes qüestions bàsiques sobre la matèria que influeixen, a la llarga, en el concepte que en puguin tenir el públic en general o els filòsofs en particular. Aquests darrers han d'intentar elaborar una visió global del món a partir dels coneixements especialitzats de les diverses branques de la cultura i de la recerca i plantegen, doncs, interessants punts de vista que forcen a sortir del domini més especialitzat i inviten a establir relacions de caire general entre els diversos coneixements. L'estudi de la matèria, els esforços per definir-la i estudiar-ne les propietats, és un dels camps de confluència més intensos entre ciència i filosofia.

Molts filòsofs han advertit, darrerament, de les dificultats de definir la matèria en la nova física, cosa que omple aquest concepte, més o menys clar en altres èpoques, d'ambigüitats i contradiccions. Cèsar Ulises Moulines, en els seus estudis sobre *Los conceptos de la materia y sus dificultades* o, abans, Gaston Bachelard, en *L'activité rationaliste de la physique contemporaine* han exposat, amb certa extensió, algunes d'aquestes dificultats.

El concepte actual de matèria està més allunyat que mai de la visió que sobre la matèria proporcionen els sentits: la forma, el color, la rotunditat de la presència dura i impenetrable s'esvaeixen en una matematització plena de subtileses. Les visions clàssiques de la matèria (matèria com a substrat universal, com a oposició a l'esperit, com a oposició al buit, com a indivisible) són qüestionades enèrgicament per la física moderna. I, tot i això, certs jocs de dualitats i oposicions (llum/matèria, buit/matèria, Déu/matèria, ment/matèria, energia/matèria, matèria/forma...) són útils com a referència de discussió, com a font de preguntes tècniques o metafísiques, i subsisteixen com a fonts d'interrogació.

L'objectiu d'aquest text és presentar una panoràmica sobre alguns dels problemes que planteja avui l'estudi de la matèria des del punt de vista de les ciències

i veure com aquests problemes, o les noves perspectives que obren, estan relacionats amb els diferents conceptes de matèria que els filòsofs han proposat al llarg de la història. Cal confessar, però, que els meus coneixements de filosofia són molt escassos, motiu pel qual cal considerar les afirmacions contingudes en aquestes ratlles com a simples indicacions o suggeriments destinats a desvetllar la curiositat del lector més que no pas com a presentació fidedigna i rigorosa de l'estat actual o de l'evolució històrica del materialisme. Les introduccions a les perspectives filosòfiques als temes tractats només aspiren a proporcionar una panoràmica de referència sobre qüestions que han estat analitzades al llarg de més de dos mil cinc-cents anys. El lector que vulgui aprofundir en aquestes qüestions, massa ignorades en els llibres de divulgació científica, caldrà que acudeixi a textos de filosofia. D'altra banda, donada l'abundosa bibliografia recent sobre divulgació científica, he preferit optar per la concisió en la presentació dels temes científics, per tal que fos més fàcil tenir una visió de conjunt d'aspectes d'interès especial que corrien el risc de quedar sepultats sota d'un excés d'informació tècnica massa detallada.

Com a científic, he dedicat moltes hores a l'estudi i la descripció de certes propietats de la matèria; per això, vaig trobar atractiva i agraïxo profundament la invitació que em féu la Fundació Joan Maragall, en ocasió del descobriment del quark *top* el 1994, a comparar la meua visió de la matèria amb les moltes visions que la filosofia n'ha prodigat. En intentar aquest esforç m'he vist obligat a estudiar, no sé si amb gaire profit, punts de vista que, altrament, m'haurien romàs desconeguts per sempre i que m'han semblat fascinants.

Tinc la impressió que el moment actual és un moment de crisi, potser passatgera, per al materialisme, i aquesta serà la tesi sostinguda en aquests escrits. En la ciència, la idea de crisi resulta especialment estimulante i excitant per als científics que la conreen; crec, per analogia, que els filòsofs interessats en el materialisme poden sentir-se atrets, també, per comentaris sobre una crisi en el seu camp.

He dividit els capítols —que corresponen a quatre conferències que vaig donar a Barcelona el mes de maig de 1995 invitat, com he dit, per la Fundació Joan Maragall— en quatre aspectes de l'estudi científic: la matèria elemental, que ens duu a explorar l'estructura de la matèria; la matèria cosmològica, o estudi de l'origen de la matèria; la matèria tecnològica, que ens enfronta amb problemes de transformació i ús de la matèria, i la matèria viva, que planteja problemes considerables i subtils sobre l'origen de la vida o la relació entre la ment i la matèria. Cada tema d'aquests suscita, també, qüestions filosòfiques pròpies: les relacions entre matèria i realitat, entre matèria i Déu, entre matèria i forma i entre matèria i ànima, qüestions inexhauribles a les quals aquest text no pretén aportar respostes concretes, sinó tan sols formular les preguntes en un llenguatge pertinent i adaptat a la ciència d'avui.

Barcelona, maig de 1996

1. LA MATÈRIA ELEMENTAL

L'estructura de la matèria

1.1. L'ATOMISME FILOSÒFIC

El primer que colpeix en una consideració sobre la matèria és la seva diversitat i la seva mutabilitat: generació, puixança, decadència, putrefacció, un continu canvi, una extrema diversitat i, malgrat això, una sensació de permanència i unitat. No fou pas fàcil ni intuïtiu intentar posar un ordre en aquesta diversitat. En els segles VI-V a. C., els filòsofs jònics començaren a tractar la qüestió del possible principi comú subjacent a tota la matèria, principi que havia de ser, alhora, compatible amb la seva extrema diversitat. La ciutat de Milet fou l'escenari de les propostes més conegudes: Tales suggerí que l'aigua era la base de tota matèria, mitjançant les possibilitats d'adaptació que li conferien la congelació i l'evaporació; Anaximandre suggerí que el fons de tot era l'*àpeiron*, l'indeterminat, quelcom d'abstracte d'on tot sorgia; Anaxímenes defensà que l'aire constituïa la base de totes les coses, gràcies a diverses rarefaccions i condensacions.

Heràclit d'Efes defensà, més que no pas la permanència, la mutabilitat essencial del món, dominat pel combat i el conflicte, sotmès, en el millor dels casos, a una harmonia de tensions oposades. Identificà l'essència de les coses amb el foc, i en destacà la mutabilitat essencial i la sospita que els sentits, basats en aquesta informació contingent i efímera, poden donar informacions enganyoses que cal discernir amb l'ajut crític de la raó. La matèria esdevenia, així, no tan sols patrimoni de la informació directa dels sentits sinó objecte de raó.

L'ocupació persa de les costes de l'Àsia Menor desplaçà considerables multituds cap a Sicília i el sud d'Itàlia. Fou allà on es desenvolupà l'escola pitagòrica, que veié en els nombres l'essència del real, no tan sols com a forma pura sinó fins i tot com a matèria essencial. Les relacions numèriques

entre les longituds de les cordes de la lira, la sublimació mística dels nombres marcaren profundament molts dels seus successors. Potser la més gran tragèdia d'aquesta escola fou, irònicament, el cèlebre teorema de Pitàgores, que introduí l'evidència de la presència de nombres irracionals en el món, com ara el quocient entre la diagonal d'un quadrat i el seu costat.

Parmènides d'Elea dugué més enllà que ningú la sospita sobre les limitacions dels sentits; postulà, en el seu poema *Sobre la Natura*, la immutabilitat, immobilitat, eternitat i unitat bàsiques de l'ésser, i negà el buit i el moviment, els quals atribuï a aparences enganyoses dels sentits. La posició de Parmènides havia de tenir també una influència molt profunda en la filosofia. Un dels motors de recerca de la ciència ha estat, precisament, la recerca d'elements de permanència rere la diversitat i el trànsit del món.

Aquesta enèrgica postulació d'unitat no impedí, però, que reflexions posteriors sobre la constitució de la matèria s'obriessin a una certa multiplicitat bàsica. Així fou, per exemple, en la teoria dels quatre elements, sistematitzada per Empèdocles d'Agrigent, segons la qual tot està compost d'aigua, terra, aire i foc, combinats diversament segons les tensions de les forces d'interacció de l'amor i de l'odi. Anaxàgores dugué més enllà la idea de la diversitat fonamental de la matèria i suggerí l'existència d'un nombre infinit d'elements o «llavors» de la realitat, la qual seria, doncs, essencialment irreductible a cap simplificació.

L'intent més genial i perdurable de conciliar permanència i canvi, unitat i diversitat fou la teoria atomística, proposada originalment per Leucip de Milet i Demòcrit d'Abdera, els quals postularen que la matèria no és contínua, sinó formada per àtoms elementals, indivisibles, que es mouen en el buit. Aquests àtoms estarien formats per una substància única, increada, eterna, representació de l'absoluta plenitud de l'ésser, la qual formaria àtoms indestructibles de diverses formes i grandàries, les agregacions dels quals donarien lloc a formes canviants, més o menys efímeres. La teoria atomística, amb certes discussions sobre el paper del buit (acceptat o rebutjat, segons els autors) o la naturalesa del moviment (determinista en Demòcrit o aleatòria en Epicur), podia ésser conciliada fàcilment amb la teoria dels quatre elements.

En particular, Plató, en el *Timeu*, el seu diàleg més científic, tret d'alguns elements inicials una mica grotescos, féu confluïr la matematització pitagòrica, l'atomisme democritià i la teoria dels quatre elements, atribuint un políedre regular a la forma dels àtoms de cadascun d'aquests elements (tetraèdre, foc; octaèdre, aire; icosaèdre, aigua; hexaèdre, terra; els tres primers constituïts per cares triangulars i el darrer per quadrats), i estudià des d'un punt de vista matemàtic les restriccions que això implicava sobre les transformacions possibles de la matèria. La matematització polièdrica de la matèria es complementava amb

la matematització esfèrica i circular del cel, que influí durant molts segles sobre la cosmologia, fins que, molt a desgrat i forçat per les seves observacions astronòmiques, Kepler introduí l'el·lipse com a figura geomètrica de les òrbites planetàries.

La tradició de Demòcrit, ininterrompuda, passà a Epicur (segle III a. C.) i a Lucreci (segle I a. C.), el qual, en el seu gran poema *De rerum natura*, en presenta una de les formulacions més nítides, àmplies i influents. Aquests dos autors intentaren treure conseqüències vitals i morals a partir d'aquelles hipòtesis físiques intel·lectuals. En ells, l'atomisme suposà una opció filosòfica radical que no deixava opció a cap mena d'ànima. En el poema de Lucreci, l'atomisme és utilitzat per tranquil·litzar els humans, garantint que, en no haver-hi cap mena d'ànima capaç de sobreviure a la mort, no hi ha cap possibilitat de turment a mans dels déus, després de la mort. La mort, doncs, no era sinó un alliberament i no havia de ser temuda. Després d'ella, cap càstig, cap tortura, cap vagar d'ombres tristes i tèrboles en l'hades. La saviesa consistia, doncs, en una fruïció mesurada i serena de la vida més que no pas en cap forma de pietat enfocada al més enllà. Per això, l'atomisme antic fou ràpidament associat a l'ateisme, tot i que, de fet, no implicava necessàriament l'absència de déus. Així, per exemple, Epicur i Lucreci creuen en la possibilitat de déus materials immortals, compostos d'una matèria especialment subtil, que podrien servir d'exemple als humans, però que no actuen sobre el món.

Aquell atomisme, de fet, ja plasmà els problemes conceptuals amb què més tard s'havien de trobar els materialismes que atorguen a la matèria l'exclusiva de la realitat. Alguns autors han suggerit que, potser, un dels motius de fons de les disputes de l'Església amb Galileu podria haver estat la seva defensa de l'atomisme, més que no pas la seva defensa del model copernicà del sistema solar. En defensar la immutabilitat de la matèria, la transsubstanciació real de l'hòstia en la consagració podia quedar seriosament posada en dubte. Donat que aquest dogma és molt més central que no pas les consideracions sobre l'estructura del cosmos, la reacció de l'Església hauria estat especialment contundent, alhora que prou secreta. En el Renaixement, en efecte, la hipòtesi atomista recobrà vigor, i Gassendi (segle XVII) repregué les idees platòniques, que influïren fortament en els cercles llibertins, que s'expressaven críticament respecte als postulats metafísics i que preconitzaven, novament, l'epicureisme com a saviesa de viure.

La teoria dels quatre elements va durar molts segles i va inspirar força treballs químics, ja que era prou flexible per atribuir uns pocs principis al darrere de la diversitat de la matèria. Durant molts segles, l'atomisme no passà d'aquesta forma senzilla, que adquirí més subtileza i profunditat amb l'obra

dels alquimistes, la qual posà en el seu centre la convicció de la possibilitat de mutació de la matèria. Els segles XVIII i XIX són una època de floreixement de l'atomisme, però ara, ja sota la iniciativa de la ciència més que no pas de la filosofia. De fet, la teoria del flogist de Stahl és encara una derivació directa d'aquesta visió del món, en la qual el flogist és una manifestació de l'element del foc.

1.2. L'ATOMISME CIENTÍFIC

Des del punt de vista científic, l'atomisme sofreix una sèrie d'avenços i retrocessos. En el segle XVII, l'anglès Robert Boyle, descobridor de la primera llei quantitativa sobre el comportament dels gasos, segons la qual el producte de la pressió que actua sobre el gas pel volum que aquest ocupa roman constant si la temperatura roman constant, veié en la teoria atomística i en el moviment dels àtoms una explicació mecànica senzilla de les regularitats de les propietats dels gasos.

Més que els arguments purament físics, foren els químics els que impulsaren més vigorosament les idees atomistes. La revolució química de Lavoisier, a finals del segle XVIII, representà un avenç molt notable en l'ordenació de la matèria, ordenada ja no en quatre sinó en una cinquantena d'elements fonamentals, ja que establia, a partir de l'observació acurada de la conservació de la massa, una nova teoria per a la combustió, que arraconava el flogist i postulava l'oxigen i el calòric.

L'exploració química féu que el nombre d'elements anés creixent lentament. Dalton, cap al 1805, formulà amb cert rigor una versió atomística que associava un tipus d'àtom a cada element químic i insistia en el concepte del pes atòmic característic de cada element. Avogadro i Gay-Lussac aprofundiren en la idea que els gasos estan compostos d'àtoms i s'esforçaren a trobar algunes dades quantitatives per reforçar aquesta hipòtesi. Amb això, la teoria atomística aconseguia donar una interpretació senzilla a observacions experimentals quantitatives, referents a la constància de proporcions en les masses de les diverses substàncies que intervenen en les reaccions químiques, expressades en les lleis de les proporcions simples de Proust o en la de les proporcions múltiples de Dalton. No sempre aquestes idees foren acceptades. Molts químics, com ara el cèlebre Berthelot, pretengueren que el fons de la realitat es trobava en els equivalent químics (concepte macroscòpic) fàcilment mesurables, més que no pas en àtoms inobservables i problemàtics, àtoms que, d'altra banda, no explicaven el perquè de les diferents valències dels elements.

Els elements químics, però, no varen començar a ser ordenats de manera intel·lectualment satisfactòria fins a la taula periòdica de Mendeleiev, el 1869, una ordenació basada en la correlació entre certes propietats químiques i físiques i els pesos atòmics, i que dugué, fins i tot, a la predicció de nous elements mai no observats per tal d'emplenar els buits que la lògica de la classificació deixava. L'atomisme assolí, així, poder predictiu verificat posteriorment.

L'atomisme físic, impulsat per Boyle, primer, i per alguns treballs de teoria cinètica dels gasos d'Euler i Boscovitz, no assolí una certa maduresa fins a les teories cinètiques de Maxwell i de Boltzmann, que permeteren fer prediccions quantitatives sobre el valor dels coeficients de transport dels gasos, com ara la conductivitat tèrmica i elèctrica, la viscositat o el coeficient de difusió. Malgrat això, la hipòtesi atomística trobà fortes resistències per part de filòsofs i científics positivistes, com Mach i Ostwald, que postulaven un model continu per a la matèria, basada en l'energia com a darrera realitat. Lord Kelvin, per exemple, tractà de conciliar la idea d'un rerefons continu i d'una manifestació atomística discreta tot proposant que els suposats àtoms eren vòrtexs en el fluid de fons. En el capítol tercer, tractarem amb més detall aquesta polèmica.

Els primers èxits matemàtics de l'atomisme físic coincidiren, però, amb l'èxit del concepte de camp com a alternativa a l'acció a distància, proposat per Faraday i dut a la seva culminació en els treballs teòrics de Maxwell sobre l'electromagnetisme, amb la predicció d'ones electromagnètiques de les quals la llum seria un cas particular. El camp electromagnètic proporcionava un element continu, no atomístic, i forçava a omplir el buit amb una substància hipotètica, l'èter, en el qual es propagarien aquestes ones. Els posteriors estudis experimentals i les aplicacions de les ones electromagnètiques fets per Hertz i Marconi convertiren les ones electromagnètiques en un dels protagonistes del seu temps. La telegrafia sense fils constituí una important revolució en les comunicacions. Trobem, així, una dualitat entre matèria discontinua i radiació contínua, que no començaria a ser superada fins als treballs d'Einstein de 1905 sobre l'efecte fotoelèctric i sobre la relativitat especial.

La descoberta de l'electró per J. J. Thomson (1897), que identificà com a partícules els raigs catòdics, introduí elements discrets en el camp de l'electricitat i estimulà l'estudi del món atòmic. El seu model atòmic, en què el nucli era vist com una esfera flonja positiva en el si de la qual es movien els electrons, fou refutat experimentalment per Rutherford (1910), qui posà de manifest que les càrregues positives havien de trobar-se agrupades en el centre de l'àtom, en una minúscula esfera de densitat enorme, al voltant de la qual haurien d'orbitar els electrons. S'inicià, així, l'època culminant de l'atomisme.

Un pas endavant en l'acceptació de l'àtom foren els pacients treballs de Jean Perrin, el qual acumulà en el seu llibre *Les atomes* uns tretze procediments diferents de mesura del nombre d'Avogadro (nombre d'àtoms en un mol de matèria). Tots tretze procediments portaven a valors molt semblants a aquest nombre, essencial en la interpretació atòmica, cosa que confirmava la plausibilitat i versemblança d'aquesta interpretació.

No deixa de ser una ironia que, precisament quan el concepte d'àtom començava a guanyar autoritat i credibilitat, la descoberta de la radioactivitat per Becquerel el 1896 i els estudis posteriors i molt detallats del matrimoni Curie posessin de manifest la inestabilitat de l'àtom, ens que havia estat postulat precisament com a garantia de la immutabilitat profunda de la matèria. Les idees sobre la indivisibilitat de l'àtom i sobre l'eternitat de la matèria deixaren pas a la idea d'una estructura més profunda.

Paral·lelament a aquesta explicació de l'ordre de la matèria, emergien algunes noves confirmacions de l'atomisme en estudis sobre el moviment brownià en líquids, i algunes novetats conceptuals. El 1905, Einstein troba elements de superació de la dualitat clàssica que distingia entre la radiació contínua i la matèria discreta, i en els seus estudis sobre l'efecte fotoelèctric proposa que la radiació electromagnètica està quantificada, és a dir, constituïda per unes partícules elementals anomenades posteriorment fotons, de manera que les equacions de l'electromagnetisme no serien sinó una aproximació contínua a la descripció d'una realitat discreta més elemental, tal com les equacions de la mecànica de fluids són la descripció macroscòpica contínua d'una realitat atòmica més profunda.

El mateix any 1905, aquest mateix autor arriba a la conclusió teòrica que la massa no és sinó una forma d'energia, segons la cèlebre fórmula $E = mc^2$ de la relativitat especial. Segons aquest punt de vista, la massa no és una constant característica dels objectes, sinó que pot variar amb la seva quantitat de moviment, de manera que la massa augmenta en augmentar la velocitat dels objectes, i tendiria a infinit quan l'esmentada velocitat s'acostés a la velocitat de la llum. Durant ben bé trenta anys, fins al descobriment de les pèrdues de massa atòmica en les reaccions nuclears, no fou comprès amb un cert detall el significat profund d'aquesta fórmula.

El 1913, el model atòmic de Bohr posa les bases de l'explicació de l'estructura atòmica en introduir les idees de la mecànica quàntica en el món de l'àtom. Efectivament, el model planetari de l'àtom proposat per Rutherford, segons el qual els electrons girarien al voltant dels nuclis com els planetes giren al voltant del sol, era insostenible, tal com ho féu notar el propi Rutherford. En efecte, les càrregues accelerades perden energia per radiació, de manera que caurien al cap d'un temps brevíssim contra el

nucli. Bohr observà que, en postular una quantificació de les òrbites en les quals els electrons no irradiarien, s'evitava aquest desastre, es podia explicar que els àtoms tinguessin una grandària precisa i es podia descriure detalladament l'espectre d'emissió i d'absorció dels àtoms, és a dir, perquè aquests emeten o absorbeixen radiació electromagnètica amb unes freqüències característiques molt ben determinades.

El model de Bohr, complementat amb el principi d'exclusió de Pauli, segons el qual no hi pot haver en un àtom dos electrons amb els mateixos nombres quàntics, de manera que cada nivell atòmic no pot contenir més que un nombre determinat d'electrons, fa confluïr l'atomisme físic amb el químic, tot explicant de forma elegantíssima la taula periòdica de Mendeleiev. A més, els estudis de Pauling sobre l'enllaç químic clarifiquen les diverses valències dels àtoms en les seves combinacions i aclareix per primera vegada detalls importantíssims de l'estructura molecular. La combinació d'electrons i de nucli (compost per protons i neutrons) amb les primeres versions de la mecànica quàntica portaren a una de les èpoques més brillants de l'atomisme, en la qual només tres tipus de partícules donaven lloc a tota la matèria, amb una explicació molt elegant de la constitució dels àtoms i de la regularitat de llurs propietats manifestada en la taula periòdica.

La dualitat clàssica entre radiació contínua i matèria discreta duu a un dualisme encara més general i profund entre partícula i ona, dualitat restringida al principi al cas concret de la llum i que, el 1924, serà formulada per de Broglie amb tota generalitat, de manera que tot corpuscle té associada una ona i viceversa. Les idees agosarades de de Broglie, formulades en la seva tesi doctoral, foren comprovades empíricament el 1925 per Davison i Germer, els quals constataren que, quan són llençats electrons amb una energia donada contra un cristall, els electrons dispersats per la xarxa cristal·lina formen sobre una pantalla fosforescent una figura de difracció corresponent a les característiques ondulatòries postulades per de Broglie. Pocs anys després, el caràcter ondulatori dels electrons constituïa la base dels microscopis electrònics, que permetien obrir una nova perspectiva de la biologia cel·lular.

El 1926, Dirac, a partir d'una equació purament especulativa, que pretenia generalitzar l'equació de Schrödinger de la mecànica quàntica al cas relativista, predeïu l'existència del positró o antielectró i proposa el concepte d'antimatèria. Així, quan un antielectró xoqués amb un electró, tots dos desapareixerien, i deixarien només radiació electromagnètica. Aquests conceptes, que examinarem amb més detall, representen autèntiques revolucions en la concepció de la matèria i no tardaran a posar-se de manifest en la pràctica.

1.3. LES PARTÍCULES ELEMENTALS: QUARKS I LEPTONS

El 1932 foren descoberts el neutró i el positró per Chadwick i Anderson, respectivament: el primer suposava la confirmació de l'element que mancava en una concepció de la matèria; el segon posava de manifest un tipus de matèria completament nou, que feia esclatar l'esquema anterior. Abans de la descoberta del neutró, hom pensava que els nuclis atòmics estaven compostos per protons i electrons, de manera que els segons neutralitzaven les càrregues d'un cert nombre dels primers. Aquesta idea, en principi plausible, duu, però, a inconsistències pel que fa a l'espín nuclear o nombre quàntic relacionat amb les propietats intrínseques de les rotacions dels nuclis sobre ells mateixos.

La descoberta del neutró permeté iniciar amb profunditat els estudis de la física nuclear. El 1934 el grup de Fermi aconseguia a Roma la primera reacció nuclear artificial, tot llençant protons contra nuclis. Aquests darrers absorbien el neutró incident i esdevenien o bé un isòtop de l'element anterior (és a dir, un nucli amb el mateix nombre de protons que abans però amb un neutró més), o bé un element nou (reacció en la qual el neutró absorbit s'hauria transformat en protó, en una desintegració beta deguda a la interacció nuclear feble). D'aquesta manera, s'aconseguia convertir per primer cop artificialment un nucli d'un element en un nucli d'un altre i es trencava una de les barreres en el si de la matèria, barrera que els alquimistes havien anhelat de trencar per tal de transmutar en or les substàncies. El 1936, Hahn i Strassmann, a Berlín, obtenien la primera reacció nuclear de fissió: tot repetint els estudis de Fermi, però llençant ara els neutrons contra nuclis d'urani, advertiren que aquests, en lloc d'assimilar el neutró absorbit, es trencaven en dos fragments i alliberaven energia. Aquella descoberta suposaria l'inici de l'era atòmica, de la qual parlarem amb més detall en el capítol tercer.

Les dificultats inicials per aconseguir energies prou elevades en el llançament d'una partícula nuclear contra una altra féu que els estudis de física nuclear cerquessin partícules altament energètiques en els raigs còsmics que contínuament arriben a la superfície de la Terra. L'estudi de raigs còsmics posà de manifest noves varietats de partícules, com el muó i els pions. Posteriorment, la utilització d'acceleradors per llençar unes partícules contra d'altres, per tractar de trencar-les i poder esbrinar amb més detall llur estructura nuclear, féu sorgir una nova munió de partícules, en nombre creixent: kaons, partícules sigma, lambda, khi, omega... Com més energia de col·lisió, més partícules s'aconseguien i més pesants, com a conseqüència de la conversió de l'energia en matèria segons la coneguda equació d'Einstein.

A meitat dels anys seixanta, el nombre de partícules elementals descobertes superava els dos centenars, partícules, però, que tenien una vida molt

breu, entre mil·lèsims i bilionèsims de segon. Aquest nombre augmentava encara si hom hi afegia, a més, partícules de vida encara més breu, anomenades tècnicament ressonàncies. L'increment desbocat en el nombre de partícules, molt més ràpid que no pas els progressos en les teories físiques subjacents, féu que, en alguns moments, hom arribés a dubtar de la possibilitat d'una classificació simple de tota la matèria en termes d'un nombre reduït de partícules, i semblà que la idea d'Anaxàgores, d'una infinita diversitat essencial, era la més adient a la realitat.

La classificació de tota aquesta munió de partícules resultava difícil i es basava en paràmetres com la càrrega elèctrica, l'espín, l'estranyesa, el nombre bariònic i altres nombres quàntics diversos. Per resumir les idees principals direm que unes partícules són sensibles a la interacció nuclear forta i s'anomenen hadrons, mentre que d'altres partícules són insensibles a aquesta interacció i s'anomenen leptons. Els primers es classifiquen, segons la seva massa, en barions (hadrons pesants, entre els quals trobem el protó i el neutró) i hadrons de massa mitjana o mesons.

La situació es clarificà notablement quan el 1960 Gell-Mann i Zweig proposaren, independentment, el model de quarks per als hadrons, segons el qual els hadrons no són partícules elementals, sinó que estan compostes de quarks. Al principi, només tres quarks, u , d i s , de càrregues elèctriques fraccionàries ($u = 2e/3$, $d = -e/3$, $s = -e/3$, on e és el valor absolut de la càrrega de l'electró), bastaren per explicar gairebé tota la diversitat dels hadrons. El protó i el neutró, considerats abans com partícules elementals, passaven a ser compostos de tres quarks (protó: uud , $2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$; neutró: udd , $2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$). Experiments efectuats el 1969 llençant electrons de gran energia contra protons i neutrons posaren de manifest, efectivament, que aquests no són partícules carregades puntuals, sinó que estan compostos per tres càrregues fraccionàries que es mouen lliurement en el seu interior, i el valor de les quals és el valor fraccionari predit. Durant uns anys, un dels objectius de la física experimental fou aconseguir algun quark lliure. Tanmateix, tot i que els quarks estan pràcticament lliures a l'interior de protons o neutrons, la força entre ells augmenta amb la distància, i fa que la separació requereixi una quantitat enorme d'energia. Un dels problemes actuals de l'estudi dels protons i els neutrons està relacionat, precisament, amb l'explicació de l'espín total a partir de l'espín de les partícules que els constitueixen.

El 1974 s'hagué d'afegir a aquest esquema un altre quark, el c (*charm*, encís), addició que suposà una gran revolució en la física de partícules, i que féu sospitar de l'existència de més quarks a través de diversos arguments teòrics. En efecte, poc després fou descobert un quark més, el b (*bottom*) i, uns quants anys després, el 1994, el quark t (*top*), partícula llargament esperada.

El model elemental de la matèria és, avui, el següent: la matèria està composta de quarks i de leptons. Hi ha tres famílies de quarks i tres famílies de leptons, que pel que sembla, estan estretament relacionades, tot i que les teories actuals no estan en condicions de descriure amb tot detall aquesta relació.

TAULA I. *Partícules elementals*

Aquesta taula recull les partícules elementals (quarks i leptons) del model estàndard i en precisa la càrrega elèctrica en funció de la càrrega de l'electró (en valor absolut), la massa (expressada en megaelectró-volts o MeV) i l'any en què foren descobertes.

<i>Quarks</i>	<i>Càrrega</i>	<i>Massa</i>	<i>Any</i>	<i>Leptons</i>	<i>Càrrega</i>	<i>Massa</i>	<i>Any</i>
<i>Primera generació</i>							
<i>u</i>	2/3	5 MeV	1969	ν_e	0	0 MeV	1956
<i>d</i>	-1/3	10 MeV	1969	<i>e</i>	-1	0,511 MeV	1897
<i>Segona generació</i>							
<i>c</i>	2/3	1.500 MeV	1974	ν_μ	0	< 0,27 MeV	1962
<i>s</i>	-1/3	200 MeV		μ	-1	105,7 MeV	
<i>Tercera generació</i>							
<i>t</i>	2/3	12.5000 MeV	1994	ν_τ	0	< 35	
<i>b</i>	-1/3	5.000 MeV	1977	τ	-1	1.784 MeV	1975

La primera família, la de partícules més lleugeres, està composta pels quarks *u* i *d*, com a leptons, per l'electró i el neutrino electrònic. La següent família, en ordre de pes, consta dels quarks *s* i *c*, i, com a leptons, el muó i el neutrino muònic. La tercera família està integrada pels quarks *b* i *t*, pel que fa als leptons, pel tauó i pel neutrino tauònic. Cada quark es presenta en tres formes (colors) diferents (blau, verd, vermell), colors que no corresponen a colors reals, sinó que indiquen simbòlicament una propietat intrínseca dels quarks. Aquesta denominació ha dut al nom de cromodinàmica quàntica per a la teoria actual de les interaccions nuclears fortes, que es consideren avui com interaccions entre aquestes càrregues de color, tal com les interaccions electromagnètiques són interaccions entre càrregues elèctriques. Cada partícula té, a més, la corresponent antipartícula. El muó és unes dues-centes vegades més pesant que l'electró i el tauó és unes quatre mil vegades més pesant que l'electró. També els quarks de les diferents generacions tenen

masses cada vegada més elevades. La primera família és la que compon la pràctica totalitat de matèria que trobem habitualment a la Terra: els protons, els neutrons i els electrons.

Els quarks s'agrupen segons unes regles ben definides: o bé de tres en tres, amb la qual cosa formen els hadrons pesants o barions, o bé un quark i un antiquark, que formen els mesons. Les combinacions admeses són aquelles a les quals correspon «color blanc», és a dir, formades per la suma dels tres «colors» bàsics o bé per un color i el seu «complementari».

TAULA 2. Composició d'alguns hadrons en quarks, agrupats en famílies (les lletres *u*, *d*, *s* indiquen els quarks, *u'*, *d'*, *s'* antiquarks)

Barions			
	protó (<i>uud</i>)	neutró (<i>udd</i>)	
Σ^- (<i>dds</i>)	Σ^0 (<i>dus</i>)	Λ^0 (<i>dus</i>)	Σ^+ (<i>uus</i>)
	Ξ^- (<i>dss</i>)	Ξ^0 (<i>uss</i>)	
Δ^- (<i>ddd</i>)	Δ^0 (<i>ddu</i>)	Δ^+ (<i>uud</i>)	Δ^{++} (<i>uuu</i>)
	Σ^{*-} (<i>dds</i>)	Σ^{*0} (<i>dus</i>)	Σ^{*+} (<i>uus</i>)
	X^* (<i>dss</i>)	X^{*0} (<i>uss</i>)	
		W^- (<i>sss</i>)	
Mesons			
	K^0 (<i>ds'</i>)	K^+ (<i>us'</i>)	
π^- (<i>du'</i>)	η , η' , π^0	π^+ (<i>ud'</i>)	
	K^- (<i>su'</i>)	K'^0 (<i>sd'</i>)	

1.4. LES INTERACCIONS

Hi ha quatre interaccions bàsiques entre les partícules: gravitatòria, electromagnètica, nuclear feble i nuclear forta. La primera fa que els cossos caiguin vers la Terra, que la Lluna giri al voltant de la Terra i els planetes al voltant del Sol, i juga, en general, un paper bàsic en astrofísica i en cosmologia. La interacció electromagnètica és la responsable de la cohesió dels àtoms i de les molècules i constitueix la base de les ones electromagnètiques, entre les quals

hi ha la llum, els raigs X, els raigs gamma i les ones de ràdio i de televisió. Aquestes dues interaccions tenen llarg abast. Ara bé: així com les càrregues elèctriques positives neutralitzen les càrregues negatives, en el cas de la interacció gravitatòria les masses sempre se sumen. Per això, les interaccions electrostàtiques entre els objectes celestes són negligibles, i només tenen rellevància directa les interaccions gravitatòries, sempre atractives.

La interacció nuclear forta és la responsable de la unió de protons i neutrons en els nuclis atòmics, i d'ella procedeixen les grans quantitats d'energia alliberades en les reaccions nuclears de fissió i de fusió, les darreres de les quals constitueixen la font energètica de les estrelles. La interacció nuclear feble és la que provoca la desintegració beta, que converteix protons en neutrons i viceversa i que té un paper important en les reaccions nuclears que tenen lloc en el si de les estrelles.

Un dels objectius més ambiciosos de la física és arribar a unificar totes aquestes interaccions en una de sola, tal com les interaccions elèctrica i magnètica foren unificades per Maxwell en la interacció electromagnètica, el 1865. Les interaccions electromagnètica i nuclear feble foren unificades en una sola interacció electrofeble en la teoria de Weinberg i Salam, de 1968, les prediccions de la qual foren definitivament confirmades l'any 1982 en experiments duts a terme al CERN, a Ginebra.

La dualitat corpuscle-ona fa que la mecànica quàntica associï una partícula a cada interacció i que consideri la interacció com un intercanvi de partícules. Com més pesants són aquestes partícules, més reduït és l'abast de la interacció corresponent. A les partícules característiques de la matèria (quarks i leptons) cal afegir-hi, doncs, les partícules responsables de la interacció entre la matèria. A diferència de les partícules de la matèria, que obeeixen l'estadística de Fermi, és a dir, el principi d'exclusió de Pauli, que limita el nombre de partícules que caben en un cert estat quàntic, les partícules responsables de les forces obeeixen l'estadística de Bose, que permet que hi hagi moltes partícules en un mateix estat. Les primeres tenen espín semienter ($1/2$, $3/2$, $5/2$...) i les segones espín enter (0 , 1 , 2).

La interacció electromagnètica és considerada com un intercanvi de fotons, de massa nul·la. Segons la teoria unificada de les interaccions electromagnètica i nuclear feble, la força unificada electrofeble està mitjançada, a més de pel fotó, per les partícules W^+ , W^- i Z^0 . Aquestes partícules, predites per la teoria el 1968, foren posades de manifest al CERN el 1982 i, a diferència del fotó, tenen una massa considerable, cosa que explicaria el curt abast de la interacció corresponent. Mèrit especial de Weinberg i de Salam fou idear un mecanisme que explicava perquè aquestes partícules tenen una massa considerable, a diferència de la del fotó. En aquest mecanisme hi intervindria una

partícula addicional, anomenada bosó de Higgs, que encara no ha estat posada de manifest experimentalment.

Pel que fa a la interacció nuclear forta, és descrita en l'actualitat mitjançant el que s'anomena cromodinàmica quàntica, i es considera que correspon a un intercanvi de vuit partícules de massa nul·la anomenades gluons. Tot i que la massa dels gluons és nul·la —cosa que podria fer pensar en un abast infinit de la interacció corresponent— aquestes partícules interaccionen entre elles, a diferència dels fotons, que no interaccionen entre ells. Aquesta interacció entre els gluons és tal que la intensitat de la interacció augmenta molt fortament en augmentar la separació entre els quarks, cosa que fa que no sigui possible trobar quarks aïllats i que la interacció tingui curt abast. La interacció gravitatòria estaria associada amb l'intercanvi de gravitons, que serien els *quanta* de la interacció gravitatòria. Els gravitons, d'espín 2 (a diferència de les altres partícules associades amb les interaccions, que tenen espín 1) estarien associats amb les ones gravitatòries tal com els fotons estan associats amb les ones electromagnètiques, i correspondrien a ones de curvatura de l'espai-temps.

TAULA 3. *Interaccions i partícules*

Taula que indica les interaccions bàsiques i les partícules l'intercanvi de les quals està relacionat amb les esmentades interaccions.

<i>Interacció</i>	<i>Partícula</i>	<i>Massa</i>	<i>Espín</i>	<i>Any</i>
Electromagnètica	fotó	0	1	1905
Nuclear feble	W+	85 GeV	1	1982
	W-	85 GeV	1	1982
	Z ⁰	90 GeV	1	1982
Nuclear forta	gluons	0	1	1970 (indirecta)
Gravitatòria	gravitó	0	2	no detectada

Tenim, així, una classificació de la matèria elemental. Es plantegen, tot seguit, dues preguntes: hi podria haver més generacions de quarks i leptons? Podria haver-hi una realitat més microscòpica rere quarks i leptons?

Els primers arguments que limitaren, a principis dels 80, el nombre de generacions a quatre com a màxim es basaren en arguments cosmològics, relacionats amb l'abundància relativa d'heli primordial a l'Univers. Si hi

hagués més famílies, la quantitat d'heli primordial superaria el 30 %, molt per damunt de les fites superiors fixades per l'observació, que el situen en un 25 %, com ho comentarem amb més detall en el capítol següent. Posteriorment, la posada en funcionament del LEP al CERN, a principis de la dècada dels noranta, afinà encara més aquesta fita superior amb l'anàlisi del ritme de desintegració de les partícules Z^0 , el qual depèn del nombre de neutrinos, i limità a tres el nombre de famílies de partícules elementals (sempre que no s'esdevingués que els neutrinos de les generacions superiors tinguessin una massa més pesant que la de la partícula Z^0).

Pel que fa a la recerca d'una realitat més elemental o més profunda que els quarks i els leptons, aquesta ha estat estimulada per les complexitats del model actual. Tinguem present, en aquest sentit, que aquest model no és pas simple: hi ha divuit quarks (sis quarks multiplicats per tres colors), tres leptons i els seus neutrinos corresponents, cosa que fa un total de vint-i-quatre fermions, als quals cal afegir les vint-i-quatre antipartícules corresponents. Pel que fa a partícules relacionades amb la interacció, hi ha vuit gluons, el fotó, tres bosons intermediaris de la interacció feble i l'hipotètic gravitó. A més, caldria afegir-hi, com a mínim, el bosó de Higgs, i tindríem seixantadues partícules elementals. En aquesta teoria hi ha uns vint paràmetres (constants físiques, masses dels quarks, dels leptons, i dels bosons W i Z , diversos paràmetres que descriuen la intensitat de les interaccions), de manera que ens trobem, finalment, amb una teoria que sembla poc satisfactòria pel que fa a la seva elementalitat.

1.5. MÉS ENLLÀ DEL MODEL ESTÀNDARD

El model estàndard exposat fins ara no explica perquè hi ha tres generacions de partícules, ni perquè les masses de les diverses partícules elementals tenen el valor que tenen, ni perquè la càrrega del protó és exactament igual, en valor absolut, a la de l'electró. Per superar aquestes limitacions, hi ha hagut diversos intents d'anar més enllà del model estàndard i unificar les forces.

Alguns intents assagen d'unificar forces electrofebles i fortes. Un dels ingredients d'aquestes teories és la supersimetria, la qual relaciona fermions (partícules de matèria) i bosons (partícules d'interacció) i viceversa. Aquestes teories incrementen el nombre de partícules elementals amb noves partícules, les simètriques de les actuals pel que fa a l'espín (és a dir, a cadascun dels fermions coneguts associa un bosó, i a cada bosó un fermió), i que encara no han estat observades. Alguns models d'aquestes teories de gran unificació, que permeten que els quarks passin a leptons i viceversa, dugueren a la

predicció excitant de la desintegració del protó, partícula que és estable en les teories no unificades. Més de deu anys de recerca d'aquest fenomen, però, han dut a la conclusió que el protó o bé no es desintegra, o ho fa amb una semivida més llarga que 10^{32} anys, molt més llarga que l'edat de l'Univers. La recerca d'una teoria de gran unificació continua.

La integració de la gravitació en un esquema unificat planteja problemes encara molt més importants que els d'una unificació de forces electrofebles i fortes, i requereix una teoria quàntica de la gravitació, encara no assolida, tot i l'existència de diverses teories que apunten possibilitats interessants, com l'evaporació dels forats negres o l'eliminació quàntica de la singularitat inicial de l'Univers. Ho comentarem amb més detall en el capítol segon.

A finals dels anys vuitanta rebé un impuls considerable una nova manera de considerar l'estructura fonamental de la matèria. Es tracta de la teoria de les supercordes, en què s'encabirien les quatre interaccions conegudes, i segons la qual les diverses partícules no serien sinó excitacions d'unes entitats o cordes elementals, que podrien tenir diversos modes d'oscil·lacions, tal com les cordes de guitarra poden vibrar en diversos harmònics. La teoria reprèn, així, un cert regust pitagòric, per al qual el fonament de tot eren els nombres. Resulta interessant subratllar que aquestes teories, que semblen aconseguir d'unificar les interaccions fonamentals de la naturalesa, inclosa la gravitació, i que posen de manifest una simetria elevadíssima a energies molt altes (simetria que, en trencar-se a energies més baixes, produeix la impressió de la multiplicitat d'interaccions), exigeixen que l'espai-temps tingui deu dimensions, sis de les quals estarien profundament replegades, enrotllades en petites esferes de radi minúscul (10^{-35} m, molt més petit que el radi del protó). La idea segons la qual l'espai hauria de tenir més de tres dimensions fou proposada ja per Kaluza i Klein els anys trenta, en un intent, completament diferent dels actuals, d'unificar les interaccions elementals, i és, probablement, una idea nova pel que fa a les reflexions sobre la naturalesa de la realitat i de la matèria. Per ara, les enormes dificultats matemàtiques de la nova teoria, la dificultat de prediccions específiques a energies prou baixes com per ésser observades i la manca d'unicitat de solucions han retardat el ritme del progrés en aquesta direcció. Malgrat tot, a meitat dels anys noranta, estan portant, de manera indirecta, a progressos importants en camps purament matemàtics com la topologia o la teoria de nombres.

1.6. EL BUIT

El concepte de matèria és, també, un joc de contraposicions, una de les quals, potser la més òbvia, és la dualitat matèria/buit. Per a Parmènides, el buit

seria el no-ser i, per tant, no té sentit i no pot ser pensat. En l'atomisme de Demòcrit, en canvi, el buit és un element essencial, ja que resulta indispensable per permetre el moviment dels àtoms i constitueix la negació de l'ésser, expressat per la plenitud de les partícules atòmiques. Plató i Aristòtil compartiren un rebuig a la idea del buit.

En el mecanicisme de Descartes, la matèria està vinculada a l'extensió i el moviment. De fet, en els seus *Principes de la philosophie* (1644), insisteix en què l'extensió, més que no pas la duresa, el pes, el color o altres qualitats, constitueix l'essència mateixa de la matèria. Així, és inconcebible una extensió sense matèria i, per tant, és inconcebible el buit. En efecte, el model cartesià del sistema solar suposa que la rotació del Sol és transmesa als planetes mitjançant l'acció d'un fluid, el qual, en una mena de remolí, arrossega els objectes al voltant del Sol. Aquesta teoria dóna, però, una relació entre període orbital i distància al centre de forces que no coincideix amb els resultats observacionals resumits en la tercera llei de Kepler, i fou bandejada, doncs, pel model newtonià de la gravitació a distància a través del buit.

En la física, el buit ha conegut avenços i retrocessos: davant l'horror al buit de la física clàssica, els experiments de Torricelli i Pascal sobre el baròmetre i la variació de la pressió atmosfèrica amb l'altura (segle XVII) o els espectaculars experiments de l'alcalde de Magdeburg sobre la bomba de buit foren els primers a posar de manifest una certa forma de buit. La teoria ondulatòria de la llum de Maxwell (segle XIX) tornà a omplir el buit amb un èter subtil en què es propagaven les ones electromagnètiques, entre les quals hi ha la llum, èter que ja des del principi resultà problemàtic, ja que havia de conciliar una gran rigidesa, per descriure la gran velocitat de propagació de la llum, amb una gran facilitat de penetració, atès que aparentment no produeix cap efecte de frenat en el moviment dels planetes. El 1905, la teoria especial de la relativitat bandejà aquest èter hipotètic i problemàtic, ja que no es podia detectar cap velocitat de la Terra respecte a l'èter, tal com ho havien posat de manifest els acuradíssims experiments de Michelson i Morley a finals de segle, i deixà, nítid, el buit.

La teoria quàntica tornà a omplir aquest buit. El 1928, la teoria de l'electró i el positró de Dirac l'emplenava amb un oceà de partícules d'energia negativa. Posteriorment, l'electrodinàmica quàntica l'omplia amb una ebullició de partícules virtuals que apareixen i tornen a desaparèixer instants després. En efecte, el principi d'indeterminació de Heisenberg, del qual parlarem en la secció següent, permet la possibilitat de violacions de la conservació de l'energia, sempre que la durada t en què aquesta es produeix no superi un cert límit donat per $\hbar/E$, en què $\hbar$ és la constant de Planck i E la quantitat d'energia creada. Així, és possible la creació de parells partícula/antipartícula sempre que la vida d'aquest parell,

és a dir, el temps transcorregut abans d'anihilar-se mútuament sigui inferior a $\hbar/E = \hbar/(2mc^2)$, en què m és la massa de la partícula creada.

Les partícules produïdes en aquestes condicions s'anomenen partícules virtuals i no poden ser observades directament. Els efectes del buit modifiquen la identitat ben definida de les partícules. Així, la càrrega de l'electró varia amb la distància, i creix indefinidament a mesura que ens hi atansem i anem superant les diverses capes d'apantallament degudes a les fluctuacions del buit. De forma indirecta, però, poden ser observats diversos efectes deguts a aquestes partícules virtuals que confirmen la visió del buit de la mecànica quàntica. Esmentaré, d'una banda, l'efecte Lamb, que es manifesta en una minúscula alteració dels nivells energètics de l'àtom d'hidrogen respecte als calculats tenint en compte el buit clàssic: aquest efecte equival a una petita disminució de la càrrega del nucli, deguda a l'apantallament produït per les parelles virtuals. L'efecte Casimir, o aparició d'una minúscula força d'atracció entre dues plaques metàl·liques paral·leles i descarregades, és degut a la pressió produïda per les parelles virtuals, que és més gran fora de les plaques que en la zona entre les plaques. L'evaporació de forats negres, predita per Hawking però encara no observada, és deguda al fet que el fortíssim camp gravitatori proper a l'horitzó del forat negre donaria prou energia per atrapar una partícula de la parella virtual i deixar lliure l'altra, la qual semblaria procedir del forat. Així mateix, un observador que accelerés en el buit quàntic el veuria ple de partícules, la massa de les quals seria més gran com més gran fos l'acceleració de l'observador.

A més d'aquests problemes del buit absolut (és a dir, en absència de radiació, de gravitació, de matèria de camps de qualsevol mena), la cosmologia actual ens ensenya que tot l'Univers està ple d'una radiació còsmica de fons, sense que hi hagi en cap lloc un buit absolut en el qual aquesta radiació no sigui present. Estudiar la velocitat de propagació dels planetes o les galàxies respecte a aquest fons de radiació posa de manifest el seu moviment peculiar propi respecte al moviment d'expansió universal de l'espai còsmic.

Cal insistir, finalment, que ni en la teoria de la relativitat ni en la teoria quàntica el buit no es correspon amb el no-res. És més, el buit admet diferents estats i transicions entre diferents estats, les quals poden donar lloc a efectes cosmològics de gran importància, com ara una gran acceleració de l'expansió de l'Univers en els models inflacionaris proposats la darrera dècada. Tant l'espai-temps de la primera com l'ebullició de partícules i antipartícules virtuals de la segona són entitats amb dret propi. Per exemple, en la cosmologia relativista, l'espai-temps és creat simultàniament amb la matèria, i no hi ha un espai-temps buit anterior al Big Bang.

1.7. LA TEORIA QUÀNTICA I LA REALITAT

La descripció de la matèria elemental s'ha de dur a terme dintre del marc de la mecànica quàntica. Aquesta teoria fou proposada per primera vegada per Max Planck el 1900 per descriure l'espectre de la radiació del cos negre, és a dir, la distribució de l'energia radiada per un objecte calent segons les diferents freqüències de la radiació. Planck, però, no hi volgué veure una revolució, sinó que intentà durant molts anys explicar mitjançant la teoria clàssica el fet que l'absorció o emissió de l'energia radiant fos discontinua. El 1905, Einstein proposava el concepte de fotó, segons el qual no tan sols seria discontinu l'intercanvi de la radiació, sinó que aquesta seria essencialment discontinua fins i tot en la seva transmissió en el buit. El 1907, Einstein aplicava les idees quàntiques a la descripció de la variació de la calor específica dels sòlids amb la temperatura. El 1913, Bohr feia un pas de gegant amb el gran èxit assolit per la seva aplicació de la teoria quàntica en la descripció de l'espectre de radiació de l'àtom d'hidrogen. El 1923, de Broglie presentava a París la seva tesi doctoral en què postulava que els electrons presenten aspectes ondulatoris. El 1925 i 1926, Heisenberg a Gotinga i Schrödinger a Zuric proposaven les equacions bàsiques de la mecànica quàntica: la mecànica de matrius el primer i la funció d'ona el segon. El 1927, Dirac, a Cambridge, afegia una tercera formulació de la mecànica quàntica i demostrava que les diverses formulacions eren equivalents.

La teoria quàntica revoluciona les nostres idees sobre la naturalesa de la realitat. Una de les primeres constatacions bàsiques de la mecànica quàntica fou la dualitat partícula-ona, segons la qual entitats que prèviament havien estat considerades ones (com és ara el cas de la radiació electromagnètica) s'havien de considerar també partícules i, recíprocament, algunes entitats que havien estat sempre considerades corpusculars (com és el cas dels electrons o dels protons) havien de ser considerades ones en certes ocasions. El microscopi electrònic, per exemple, és una conseqüència especialment útil i rellevant de la naturalesa ondulatòria de l'electró. La visió corpuscular o ondulatòria deixava de ser una alternativa per esdevenir una unitat incomprensible i conflictiva. Per això, la mecànica quàntica, si més no al principi, es refugià en un cert positivisme, segons el qual calia renunciar a conèixer què és la realitat i limitar-se a descriure'n les manifestacions diverses, les quals, en el principi de complementarietat de Bohr, ja no eren excloentment ondulatòries o corpusculars, sinó que podien ser en algunes ocasions corpusculars i en d'altres ondulatòries per a la mateixa entitat, segons la mena d'experiment a què fossin sotmeses.

Un dels principis bàsics de la física quàntica és el principi d'indeterminació de Heisenberg, segons el qual la indeterminació en la posició multiplicada

per la indeterminació en la velocitat d'una partícula no es pot reduir arbitràriament, sinó que té una fita inferior determinada i universal, relacionada amb la constant de Planck de la teoria quàntica. Com que en la mecànica clàssica és imprescindible conèixer tant la posició com la velocitat inicials per tal de poder determinar el moviment, aquest principi causà una impressió molt profunda en la física i en els medis filosòfics, ja que minava radicalment la possibilitat del determinisme.

Aquest principi, que pot ser comprès en termes simples com una conseqüència de la dualitat partícula-ona, pot ser interpretat de diverses maneres. Una d'elles és una interpretació epistemològica, és a dir, relacionada amb el nostre coneixement de la realitat. Una altra interpretació és ontològica, és a dir, lligada amb l'essència de la mateixa realitat. La primera interpretació és més coneguda i és, de fet, la que tenen la majoria dels estudiants de física i de química en acabar els seus estudis universitaris. En aquesta interpretació, les partícules elementals (un electró, per exemple) tenen a cada instant una posició i una velocitat donades i ben definides, i és la pertorbació deguda al mesurament la que impedeix de conèixer simultàniament el valor precís d'ambdues variables. Efectivament, a diferència de la teoria clàssica, en la qual la pertorbació deguda a la interacció pot ser reduïda arbitràriament, la teoria quàntica fixa un límit inferior a l'esmentada pertorbació, motiu pel qual l'observació de la posició modificaria la velocitat i l'observació de la velocitat modificaria la posició de manera impredecible, cosa que impossibilitaria de conèixer simultàniament totes dues magnituds.

En una interpretació més elaborada, però, aquesta indeterminació duu a una visió nova de la realitat, en la qual les partícules elementals no tenen ni posició ni velocitat fins que no en mesurem la posició o la velocitat. Així, no hi hauria una realitat exterior independent de l'observador, sinó que els atributs d'aquesta realitat depenen de l'observació. Podria semblar, d'antuvi, que aquesta afirmació està més enllà de tota possible indagació experimental. Certament, és un monument a l'enginy dels científics el fet que aquesta qüestió hagi pogut arribar a ser plantejada en termes precisos i susceptibles de mesurament.

El detall argumental és llarg i deu la seva primera inspiració a un treball cèlebre d'Einstein, Podolski i Rosen (1935) que tenia com a objectiu demostrar la incompleció de la teoria quàntica. L'argument fou reprès en termes més simples per Bohm (1950), el treball del qual inspirà els estudis teòrics de John Bell, a finals dels seixanta. Aquest arribà a la conclusió que si les partícules tenen una posició i una velocitat (o una polarització) ben definides abans de dur a terme el mesurament, els resultats dels mesuraments de les posicions (o velocitats o polaritzacions) de dues partícules correlacionades (per exemple, dos fotons produïts en una mateixa desexcitació atòmica)

haurien d'obeir certes desigualtats, les quals només podrien ser superades en el cas que les partícules no tinguessin aquests atributs fins al moment del mesurament.

Suposem, per exemple, que un àtom emet simultàniament dos fotons en direccions oposades. Suposem que un polaritzador mesura al llarg de dos eixos (x, y) la polarització dels fotons que surten en una direcció i que un altre polaritzador mesura la polarització dels altres fotons al llarg de dos eixos (x', y') . Aleshores, si els fotons tenen polarització abans que la polarització sigui mesurada, s'ha de complir la desigualtat $|E(xy) - E(xy') + E(x'y) + E(x'y')| < 2$ on $E(xy)$ indica el valor mitjà de les polaritzacions mesurades al llarg dels eixos x i y , i anàlogament per als altres eixos.

Els resultats dels experiments duts a terme pel grup d'Alain Aspect a París el 1982 posaren de manifest que les desigualtats esmentades són violades. Aquest resultat pot ser interpretat o bé com una confirmació del fet que la realitat no és independent de l'espectador, o bé com una indicació que, si hi ha realitat independent, és essencialment no local, una realitat velada (en paraules de d'Espagnat), entenen per això que la realitat està connectada profundament a escales més grans que els límits fixats per la velocitat de la llum.

Una conseqüència d'aquesta visió de les partícules és que no poden ser diferenciades individualment les unes de les altres, ni tan sols mentalment. Tots els protons són essencialment idèntics. Tots els electrons són essencialment idèntics entre ells. La visió intuïtiva dels sentits sobre la matèria no és de cap manera extrapolable a la realitat microfísica. L'indeterminisme hi és radical: la desintegració d'un nucli, el pas d'un electró d'un nivell a un altre no tenen cap causa, no estan determinats per cap variable oculta, si més no de caràcter local.

1.8. CONCLUSIONS

Tractarem ara de sintetitzar com aquests problemes de frontera de la física actual repercuteixen en el concepte de matèria. Havia dit, al començament, que la situació actual representa una crisi per al materialisme. Heus ací, en el que hem vist en aquest capítol, quins poden ser alguns d'aquests elements de crisi.

La naturalesa de la matèria, relativament nítida en la seva classificació actual, esdevé profundament problemàtica. Efectivament, en parlar de l'atòmicisme filosòfic ens hem referit a uns àtoms impenetrables, eterns, constituïts per una mateixa substància i que eren una manifestació de l'ésser immutable. En el materialisme més ingenu, vinculat directament als sentits, la matèria seria la manera de ser del real, caracteritzada per forma, color, duresa, etc. A

meitats d'aquest segle, electrons, protons i neutrons semblaven heretar aquestes propietats dels antics àtoms.

En la física actual, en canvi, el model de matèria és molt diferent del model clàssic. Així, les partícules elementals són ambigües (poden ser energia o matèria, partícules o ones): poden ser partícules de matèria (fermions) o *quanta* de les interaccions (bosons); poden ser matèria o antimatèria; poden ser singularitats de camps continus sense atributs propis fins a fer-ne la mesura. Són intrínsecament indiferenciables, sense que sigui possible definir-ne cap individualitat; la seva naturalesa és variable (ja que, en donar-los més energia poden mudar-se en altres partícules o poden anihilar-se en xocar amb les seves antipartícules); la majoria d'elles són inestables en el temps. Per resumir-ho en tres punts:

- La realitat es presenta com una entitat global i profundament dependent de l'observació, fins al punt que les partícules elementals estan desproveïdes d'atributs (posició, velocitat, polarització) fins que no se'n fa la mesura. Les partícules elementals no tenen límits espacials ni existència local objectiva independent de la mesura.

- La matèria és una entitat extremadament mudable, que pot anihilar-se per esdevenir radiació, o produir-se espontàniament a partir de la radiació, o desintegrar-se diversament en altres partícules. D'altra banda, resulta difícil definir inequívocament les partícules elementals: es tracta de singularitats del camp quàntic?, es tracta d'excitacions d'unes entitats més profundes en un espai-temps de més dimensions?

- A diferència del materialisme de principis de segle, que veia una matèria ben delimitada (electrons, nuclis), sotmesa a lleis deterministes rígides, el materialisme d'avui es veu enfrontat tant a la indagació més profunda de què és la matèria com a l'indeterminisme de les lleis, tant pel que fa a la mesura quàntica com pel que fa a la impredictibilitat de les equacions deterministes en règim caòtic, a causa de la sensibilitat extrema a les condicions inicials.

En definitiva, som molt lluny de l'atomisme filosòfic de l'època clàssica o de principis de segle. La immutabilitat i solidesa que havia de conciliar canvi i permanència esdevé canvi continu i crisi d'identitat.

2. LA MATÈRIA COSMOLÒGICA

L'origen de la matèria

2.1. INTRODUCCIÓ: DÉU I MATÈRIA

En el capítol anterior ens referíem a la constitució elemental de la matèria. Ara prendrem una perspectiva diferent, tant des del punt de vista filosòfic com del científic, i ens preguntarem pel contingut de l'Univers i per l'origen de la matèria. Tractarem, així, la qüestió sobre el paper o bé absolut i exclusiu o bé subordinat de la matèria, pel que fa a la composició de la realitat.

2.1.1. EL CONTINGUT MATERIAL DE L'UNIVERS

Pel que fa a la primera qüestió, els antics suposaren una divisió radical entre l'esfera sublunar i l'espai exterior. L'espai sublunar estaria sotmès al canvi i a la putrefacció, mentre que la superior seria ordenada i eterna, i la matèria exterior seria diferent que la interior. Recordem que Plató assignà un políedre regular als àtoms de cadascun dels quatre elements primordials. Com que, però, els políedres regulars són cinc, Aristòtil suposà que el cinquè políedre corresponia a una quinta essència, un èter o matèria que poblava els espais superiors, completament diferent de la matèria de la Terra.

Les observacions astronòmiques de Galileu i la teoria newtoniana de la gravitació trencaren aquesta divisió i afirmaren l'homogeneïtat de lleis i de matèria de l'Univers. Galileu posà de manifest la presència de muntanyes a la Lluna, de taques al Sol, de planetes al voltant de Júpiter; se'n deduí que l'esfera supralunar era, també, espai de canvis, i no pas d'un moviment immutable circular. El caràcter universal de la llei de la gravitació de Newton, segons el qual l'esmentada llei regia una força d'interacció entre dos cossos qualssevol

(entre el Sol i els planetes, o entre els planetes i les seves llunes, o entre dues estrelles qualssevol), constitueix la plasmació més agosarada i fructífera de la universalitat de les lleis de la naturalesa.

Pel que fa al contingut material de l'Univers, els estudis de Fraunhofer de la llum procedent del Sol posaren de manifest un possible mètode per estudiar la matèria de les estrelles. De fet, el gas heli fou descobert abans al Sol que no pas a la Terra, a causa de la presència de les seves línies d'absorció característiques en la llum procedent del Sol. Quan aquests estudis foren estesos a d'altres estrelles, hom pogué observar que les característiques dels espectres de la llum procedent de les diverses estrelles tenien moltes similituds amb les dels espectres de la llum obtinguts en el laboratori amb hidrogen i heli calent. La matèria del Sol i de les estrelles semblava ser, doncs, matèria coneguda, i no pas una matèria exòtica.

Posteriorment, Maxwell féu notar que calia que l'Univers estigués ple d'un èter pel qual es propaguessin les ones electromagnètiques, èter amb propietats estranyes (havia de ser infinitament rígid i, alhora, cedir el pas als planetes sense cap resistència) que introduïa una incògnita en el contingut de l'Univers. Aquest èter hipotètic, però, fou desmentit per l'experimentació posterior que intentà mesurar, sense èxit, la velocitat de la Terra respecte a aquest èter. La necessitat d'aquest fou eliminada per la teoria especial de la relativitat, proposada l'any 1905. Tractarem posteriorment la qüestió sobre el contingut de l'Univers en la cosmologia actual.

2.1.2. L'ORIGEN DE L'UNIVERS I DE LA MATÈRIA

La segona qüestió, la de l'origen de la matèria i de l'Univers, està íntimament relacionada amb un dels debats o dualismes bàsics del materialisme: la relació entre matèria i Déu. Al llarg de la història, hi ha hagut diverses maneres d'imaginar aquesta relació:

- a) *Matèria creada per Déu*
 - Déu crea el món del no-res i hi segueix actuant
 - Déu crea el món i no hi actua més
- b) *Matèria i Déu són dues realitats eternes i diferents*
 - caos primordial ordenat parcialment
 - fusió de Déu i la matèria
 - matèria com a principi oposat a Déu
- c) *Déu i la matèria són una sola realitat*
- d) *Matèria és la sola realitat*
 - eterna
 - no eterna

Abans de començar l'exposició de caire més estrictament científic sobre l'estat actual de la recerca en cosmologia pel que fa a la formació de la matèria, examinarem breument aquests diversos punts de vista, tan importants en la concepció del món.

a) Matèria creada per Déu

Déu crea el món del no-res i hi segueix actuant. Aquest és el punt de vista del llibre del Gènesi, inspirador del judaisme, del cristianisme i de l'islamisme. Déu crea el món a partir del no-res, el crea de manera gradual, i segueix actuant sobre el món, no ja tan sols a través d'unes lleis físiques, sinó també mitjançant l'amor. Déu dóna realitat als valors morals i dóna sentit al món. Preguntes bàsiques en aquest context són: com crea Déu el món, què representa l'eternitat de Déu, per què si Déu és alhora totpoderós i bo, hi pot haver mal a l'Univers

Déu crea el món i no hi actua més. Aquest és el punt de vista del deisme científic, que interpreta Déu com la racionalitat de la naturalesa, l'expressió més pura de la qual es trobaria en les lleis bàsiques de la física. Déu només actua sobre el món mitjançant aquestes lleis, però és impersonal: Déu no té cura dels homes, no sustenta els valors humans i no dóna cap sentit especial a l'Univers. En la física newtoniana, el món deixà de ser vist com un ésser orgànic, inspirat en la biologia, i passà a veure's com un mecanisme de rellotgeria, i Déu com un rellotger que, un cop creat l'Univers, hauria deixat d'intervenir-hi i l'hauria deixat evolucionar segons les lleis mecàniques. En altres versions, com la d'Einstein, Déu és un matemàtic, és a dir, racionalitat pura. En algunes ocasions, aquesta racionalitat es veurà com a transcendent al món i en d'altres com a immanent al món, amb la qual cosa es desemboca en una forma de panteisme.

b) Matèria i Déu són dues realitats eternes i diferents

Caos primordial ordenat parcialment. En algunes cosmologies, l'Univers no ha estat pròpiament creat a partir del no-res, sinó que ha estat ordenat per un déu o demiürg a partir d'un desordre primordial de la matèria (aigua en les cosmologies babilòniques, caos en el *Timeu* de Plató). La naturalesa d'aquest ordre pot ser matemàtica, com en el *Timeu* de Plató. Aquest ésser no aconseguí d'ordenar completament aquest caos, a causa d'una resistència aferrissada d'aquest a l'ordenació. Per això, tot i que el demiürg és bo, hi ha per tot arreu reductes de desordre que introdueixen el mal en el món.

Fusió de Déu i la matèria. En altres ocasions, es contempla la dualitat de Déu i de matèria com una fusió. Així, en el materialisme estoic, expressat en textos d'autors com Epictet, Sèneca o Marc Aureli, el món es veïé com una dualitat de Déu i matèria no pas en oposició sinó en fusió estretíssima, com una mescla del cos de Déu i del cos del món, semblant a una mescla d'aigua i vi. Els humans, mitjançant la raó, podrien accedir a Déu a través de la consciència de la presència en ells de l'esperit de Déu. El materialisme estoic, sovint adversari del materialisme epicuri, té com a base no pas el pensament de la física sinó més aviat el pensament de la medicina, i contempla l'Univers com un organisme i no com un mecanisme. La teoria dels quatre elements era interpretada per aquesta escola com una fusió dels elements aeris i càlids (foc, aire) amb els principis pesants i freds (aigua, terra). En diverses ocasions, els estoics defensaren la teoria de l'etern retorn, en la qual Déu, el foc, consumiria l'Univers i el refaria.

Matèria com a principi oposat a Déu. En aquesta interpretació, la matèria és vista com un principi oposat a Déu i que representa la força obscura i terrible del mal. Un dels exemples d'aquesta manera de veure el món són les cosmogonies perses o la dualitat maniquea de bé i mal, en la qual la matèria és un dels noms del mal. Cap als segles I i II d. C. la gnosi judaica, que compartia aquesta visió negativa de la matèria, distancià el món i la divinitat, tot interposant en l'espai intermig éssers estranys, com àngels i dimonis, i distingint el Déu suprem totpoderós del Déu creador limitat, en lluita contínua contra la matèria. Només alguns éssers podrien conèixer Déu per una guspira de la divinitat que es trobaria en llur consciència. Posteriorment, els càtars adoptaren també aquest punt de vista de malfiança envers la matèria. També retrobem el tema de la matèria com a presó de l'ànima, com a finitud dolorosa, en molts moments de la història teològica cristiana.

c) Déu i la matèria són una sola realitat

En altres ocasions, la identificació entre Déu i matèria és absoluta, i hom identifica Déu i Univers: es tracta de les teories panteistes, segons les quals tot és Déu. Una de les obres més emblemàtiques en aquest sentit és l'*Ètica* de Spinoza (segle XVII). Alimentada de fonts diverses com el mecanicisme cartesià, les tradicions filosòfiques hebraïques i cabalístiques i algunes reminiscències neoplatòniques, un dels temes centrals en la filosofia de Spinoza és l'afirmació d'una unitat de substància del món, substància única que no pot ser altra que Déu. Aquesta idea s'oposa tant a la idea de creació com al dualisme ontològic de Déu i el món o del pensament i la matèria. Així, aquesta unitat de substància es refereix tant a la unitat de Déu i la natura (*Deus sive Natura*),

com a la unitat de pensament i matèria. La correspondència entre Déu i natura seria estricta i no hi hauria, doncs, cap mena de transcendència ni cap domini de Déu respecte a la naturalesa. Així, la substància no seria pas el principi del qual procedirien els atributs sinó que s'identificaria amb ells, de manera que la naturalesa seria un absolut. L'ordre del món no procediria pas d'un ordre superior, sinó que seria per ell mateix i expressaria la totalitat del real. Els humans no tindrien cap privilegi ni suposarien cap ruptura respecte als altres éssers naturals, que només trobarien salvació específica en l'amor intel·lectual de Déu.

d) La matèria és la sola realitat

Eterna. En els materialismes atomistes clàssics, la matèria és la realitat bàsica, l'ésser etern i indestructible, increat, que forma àtoms immutables. Les combinacions d'aquests àtoms són contingents i més o menys efímeres. N'hem parlat amb detall en el capítol anterior.

No eterna. El debat sobre un Univers d'edat finita o un Univers etern ha estat permanent en filosofia, sense arribar a criteris determinants per decidir entre una forma i l'altra. En l'actualitat, el model del Big Bang suposa que la matèria no és eterna, sinó que ha començat en un moment determinat. Això no implicaria, però, acceptar necessàriament un Déu creador. Se suposa que el món podria aparèixer a l'atzar.

2.2. L'EDAT DE L'UNIVERS I L'INICI DE LA MATÈRIA

El 1916, Einstein aplicà les seves equacions de la relativitat general a la descripció de l'Univers. La seva sorpresa fou gran quan arribà a la conclusió que l'Univers descrit per aquelles equacions no podia ser estàtic. Tant el desplaçament aquest resultat, que modificà les seves equacions, tot afegint-hi un terme anomenat constant cosmològica. Ni tan sols així, les solucions estàtiques resultaven estables: l'Univers havia de resultar una entitat dinàmica.

Aquestes idees haurien estat una paradoxa simplement teòrica si no hagués estat per les observacions de Hubble. Amb ell, la cosmologia experimentà una extraordinària revolució amb la descoberta (1929) de l'allunyament sistemàtic de les galàxies, amb una velocitat d'allunyament proporcional a la separació entre elles, que sembla posar de manifest una expansió de l'Univers. La velocitat d'allunyament de dues galàxies qualssevol pot ser expressada com a $v = Hr$, on r és la distància entre les galàxies en qüestió, i on H és la «constant» (que no depèn de les galàxies, però sí que

pot variar amb temps) de Hubble. Extrapolant vers el passat aquest moviment de les galàxies, arriba un instant en què les posicions de totes elles coincidirien, moment que podríem interpretar com origen de l'Univers i que ve a valdre, aproximadament, $1/H$. Segons això, l'Univers tindria una edat finita i les discussions sobre el valor d'aquesta edat no serien exclusivament mentals sinó que es podrien contrastar observacionalment.

El valor del factor de Hubble, que descriu la velocitat d'allunyament de les galàxies, no és gaire ben conegut, i hi ha un debat notable sobre el seu valor. La imprecisió amb què es coneix aquest factor és gran, i situa l'edat de l'Univers entre 8.000 milions d'anys i 15.000 milions d'anys. Les darreres dades del satèl·lit Hubble apunten a una edat curta, inferior a l'edat estimada de les galàxies més velles. Si això es confirmés, malgrat l'escepticisme amb què molts cosmòlegs veuen aquesta dada, caldria revisar el model del Big Bang.

L'allunyament de les galàxies no exclou necessàriament un Univers etern. Així, hi ha hagut intents de fer compatible l'expansió amb un Univers etern. Els models d'Univers en estat estacionari, proposats per Hoyle, Bondi i d'altres, suposaven que l'Univers no es forma de cop, sinó que a mesura que procedeix l'expansió es va creant matèria, de manera que, malgrat l'expansió, la densitat de l'Univers roman constant. De fet, el ritme de creació necessari és molt baix, d'un àtom d'hidrogen per quilòmetre cúbic i per any, de manera que, a efectes pràctics, seria inobservable. Tot i que aquest model topà amb dificultats aparentment insalvables quan fou descoberta la radiació de fons de microones o l'abundància de quàsars a gran distància de nosaltres, conceptualment segueix tenint un cert interès, ni que sigui com a contrast amb el model més acceptat. En cap de les dues versions, però, la matèria no és eterna sinó que té o bé una edat màxima ben definida o bé una distribució d'edats.

Altres autors actuals proposen la presència de «forats blancs», o fonts intensíssimes i puntuals de creació de matèria, en oposició a la creació contínua i homogènia dels models d'estat estacionari. Així, no hi hauria només una gran explosió inicial, sinó que aquesta vindria acompanyada de petites explosions creadores locals. Des del punt de vista conceptual, el fet que la matèria tingui història i edat finita, en lloc de ser eterna, és el punt més interessant. Segons això, resulta més difícil identificar la matèria amb l'ésser immutable i etern de Parmènides o identificar-la amb Déu.

2.3. L'ORIGEN DE LA MATÈRIA

La cosmologia moderna dóna una imatge de com s'ha format la matèria i obre, alhora, interrogants respecte al contingut de matèria de l'Univers. En

el model estàndard del Big Bang o gran explosió, l'inici de l'Univers seria una singularitat, és a dir, un estat caracteritzat per una temperatura infinita i una densitat infinita. A mesura que la temperatura de l'Univers va davallant, a causa de la seva expansió, el contingut material de l'Univers va canviant. La connexió entre els continguts de l'Univers i la seva evolució ha fet que la física de partícules elementals i la cosmologia (les teories del més gran i del més petit) conflueixin de manera natural i molt atractiva en el model cosmològic estàndard. Per altra banda, les observacions cosmològiques constitueixen avui un dels bancs de prova de les teories més avançades i especulatives de partícules elementals.

TAULA 4. *Breu història de la cosmologia física moderna*

1915	Einstein proposa la teoria de la relativitat general
1917	Einstein aplica la seva teoria a la descripció de l'Univers: li resulta impossible descriure un univers estàtic. Introdueix la constant cosmològica per tal de poder-ho aconseguir
1929	Hubble observa l'expansió de l'Univers
1930	Lemaître proposa la teoria de l'explosió primordial
1939	Bethe proposa que els elements pesants s'han format a l'interior de les estrelles
1945	Gamow: idees sobre la nucleosíntesi primordial
1965	Descoberta de la radiació còsmica de fons
1992	Descoberta de fluctuacions en la radiació còsmica de fons

Vegem molt breument les etapes principals de la història tèrmica de l'Univers, abans d'examinar-les amb més detall:

– Inicialment, el contingut de l'Univers degué ésser una mescla de radiació i de partícules de tota mena de masses, amb predomini de les de massa més gran, partícules que anomenarem X i que mai no han estat encara observades ni produïdes a la Terra. La desintegració d'aquestes partícules donà lloc a quarks i leptons, els constituents elementals de la matèria, que hem descrit en el capítol anterior.

– En seguir-se refredant l'Univers, els quarks s'agruparen de tres en tres o de dos en dos per donar lloc als hadrons.

– 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).

– 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.

– En aquestes darreres s'anaren formant les estrelles, en el si de les quals s'anaren produint nuclis cada vegada més pesants. En explotar la primera generació d'estrelles, llençaren a l'espai aquests nuclis, que permeteren que les estrelles de la segona generació poguessin estar acompanyades de planetes compostos per elements pesants.

Estudiarem ací aquestes diverses transicions i ens preguntarem si tot el contingut de l'Univers està format per la matèria que coneixem (protons, neutrons, electrons) o si, per contra, cal fer la hipòtesi de la presència de més matèria, insospitada fins ara.

TAULA 5. *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^{14} K	Protons i antiprotons s'anihilen
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

2.3.1. LA MATÈRIA PRIMORDIAL

Entenem com a matèria primordial aquella matèria d'origen anterior a les galàxies més primitives. Aquesta matèria es formà durant els tres primers minuts de l'Univers. Les etapes més rellevants són:

a) *Formació de nucleons*. Per sota de la temperatura de 10^{15} K, els quarks tendeixen a agrupar-se de tres en tres o de dos en dos (quark i antiquark) i donen lloc a hadrons (barions o mesons, respectivament), la major part dels quals són inestables. Aquests s'anaren desintegrant fins que quedaren

els nucleons més estables: el protó, que és estable (o té una vida mitjana més llarga que 10^{32} anys), i el neutró, que té una vida mitjana d'uns divuit minuts fora del nucli i una vida molt més llarga, pràcticament infinita, a l'interior del nucli.

Mentre la temperatura és prou elevada, hi ha equilibri entre protons i neutrons segons una sèrie de reaccions nuclears ($p \rightarrow n + e^+ + \nu$, $n \rightarrow p + e^- + \text{antiv}$, $p + e^- \rightarrow n + \nu$). Aquestes reaccions, i d'altres de semblants, mitjançant per les interaccions nuclears febles, fan que els neutrons que es van desintegrant siguin refets a partir de protons.

b) *Formació de nuclis lleugers.* Per sota de 10^{14} K, hi ha una gegantina anihilació d'electrons i positrons, i les reaccions que mantenen en equilibri protons i neutrons deixen d'actuar. En efecte, ara, l'energia mitjana dels fotons, proporcional a la temperatura absoluta T , és menor que l'energia necessària per formar una parella electró-positró (que, segons la relació d'Einstein val $2m_e c^2$). 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 sola possibilitat de supervivència dels neutrons 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 característica de desintegració d'aquest nucli.

Segons la mecànica estadística clàssica, aquesta temperatura duu a una proporció ben definida de neutrons i protons, relacionada amb la diferència de masses entre el protó i el neutró. En concret, hi ha set protons per cada neutró. Si suposem que pràcticament tots els neutrons es combinen amb protons, arribem a una proporció, en massa, del 75 % d'hidrogen i gairebé el 25 % d'heli 4 (constituït per dos protons i dos neutrons), i a una petita proporció d'altres nuclis lleugers, com heli 3 i liti. En efecte, per cada dos protons que s'unissin amb dos neutrons per formar un nucli d'heli, restarien dotze protons lliures. Tindríem, així, que per cada quatre unitats de massa corresponent a l'heli hi hauria dotze unitats de massa corresponents a hidrogen, és a dir, hi hauria el triple d'hidrogen que d'heli en massa, cosa que ens duu a la proporció del 25 % d'heli i del 75 % d'hidrogen esmentada anteriorment.

Aquestes prediccions del model del Big Bang concorden força bé amb les dades observacionals i constitueixen un dels arguments a favor d'aquest model d'origen de l'Univers. Pel que fa a les proporcions dels nuclis menys freqüents (deuteri, liti, heli 3, que valen respectivament 0,001 %, 0,000000001 % i 0,001 %), són molt sensibles a la quantitat d'hadrons presents a l'Univers, i juguen un paper a l'hora de fixar límits a la quantitat total de matèria hadrònica present a l'Univers.

2.3.2. LA FORMACIÓ DE LES GALÀXIES

Entre els tres minuts i els 300.000 anys, l'Univers està format majoritàriament, doncs, per nuclis positius d'hidrogen i d'heli 4, per electrons negatius, per neutrinos i per una gran quantitat de fotons. Els electrons i les partícules positives no estan lligats entre ells, a causa de les grans energies tèrmiques de l'Univers, molt superiors a l'energia d'ionització dels àtoms. Durant aquest temps, l'Univers es va expandint i refredant sense que s'esdevingui res d'especialment notable.

Quan l'Univers arriba als 3.000 kèlvins, cosa que s'esdevé aproximadament en atènyer els 300.000 anys d'edat, la proporció d'electrons que queden lligats als nuclis positius per donar lloc a àtoms neutres és prou gran com perquè els fotons, que interaccionen molt menys eficaçment amb la matèria neutra que amb la matèria carregada elèctricament, deixin d'interaccionar amb la matèria. A partir d'ara, la radiació i la matèria aniran seguint les seves pròpies evolucions per separat: la radiació s'anirà refredant, i avui constitueix una radiació de fons de microones, a 2,7 K de temperatura, descoberta casualment el 1965 per Penzias i Wilson en estudiar el soroll de fons d'una gran antena. L'existència d'aquesta radiació és molt difícil d'explicar en la teoria de l'Univers estacionari, motiu pel qual aquesta fou abandonada per la majoria de cosmòlegs, que passaren a considerar el Big Bang com a model estàndard.

Ja no sotmesa a l'escombrat intensíssim de la pressió de radiació, la matèria s'anà agrumollant sota l'acció de la gravitació, que exerceix una força atractiva entre les masses de l'Univers i tendeix, doncs, a unir-les. Així començà la formació de les galàxies, que inicialment foren grans núvols de gas cada vegada més dens en el si dels quals s'anaren formant estrelles. Efectivament, la massa necessària per tal que predominin els efectes atractius de la gravitació per sobre dels efectes dispersius de la pressió és de l'ordre de la massa de les galàxies, molt superior a la de la massa de les estrelles.

2.3.3. LA FORMACIÓ DELS ELEMENTS PESANTS

A mesura que la matèria (hidrogen i heli) va compactant-se sota l'acció de la gravetat per donar estrelles, l'energia potencial gravitatòria va esdevenint energia tèrmica del gas i energia de radiació. El gas es va escalfant fins que arriba a una temperatura en què les col·lisions entre nuclis són prou violentes com per donar lloc a la fusió nuclear, la qual allibera grans quantitats d'energia i escalfa prou el gas com perquè la seva pressió expansiva contraresti la pressió de la gravetat. En una primera etapa, l'hidrogen forma heli. Acabat l'hidrogen, l'estrella es contrau sota l'acció de la gravetat i s'escalfa, fins que

la temperatura arriba a un punt en què tres nuclis d'heli 4 poden donar un nucli de carboni 12. Això produeix, durant un temps, una nova expansió de l'estrella, fins que s'acaba el combustible heli. Això és el que passarà amb el Sol dintre d'uns 5.000 milions d'anys: en començar la combustió d'heli la seva grandària augmentarà fins que engoleixi Mercuri, Venus i Mart, i s'elevi moltíssim la temperatura de la Terra. A continuació, s'inicia la ignició del carboni, per donar silici i altres elements, i així successivament, fins que s'arriba al ferro, que és el nucli més estable.

Si les estrelles són prou grans, en acabar el combustible nuclear la part interna es col·lapsa amb una gran velocitat i s'allibera molta energia, que llença a l'espai les capes externes de l'estrella, en forma de supernova, i dispersen el seu contingut a l'exterior; en aquests processos extremadament violents es formen nuclis més pesants que el ferro, com la plata, l'or, el plom i l'urani. Resultat d'aquesta explosió és que l'espai proper a les galàxies primitives va quedant enriquit de materials pesants, que permetran que les estrelles de segona generació puguin arribar a tenir sistemes planetaris amb àtoms pesants. Alguns d'aquests àtoms arribaran a constituir matèria viva. La cosmologia moderna ens ha descobert, doncs, que estem fets de pols d'estrelles.

TAULA 6. *Esquema simplificat de reaccions de combustió nuclear en les estrelles*

Combustió hidrogen (10 milions de graus)
$4\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + 2\text{e}^- + 2\nu$
Combustió heli (100 milions de graus)
$3{}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$
Combustió carboni (500 milions de graus)
$2{}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{24}\text{Mg} + \gamma$
$2{}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{23}\text{Na} + \text{p}$
Combustió oxigen (un bilió de graus)
$2{}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{32}\text{S} + \gamma$
$2{}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{28}\text{Si} + {}^4\text{He}$
Combustió silici (un bilió i mig de graus)
$2{}^{28}\text{Si} \rightarrow {}^{56}\text{Fe}$

2.4. MATÈRIA/ANTIMATÈRIA

Sense la descoberta de l'antimatèria, res no ens faria buscar cap entitat simètrica a la matèria que coneixem. La descoberta de l'antimatèria, però, féu

que un Univers compost tan sols per matèria resultés, en lloc de plausible i definitiu, estranyament asimètric. Efectivament, en principi, l'Univers hauria de contenir la mateixa quantitat de partícules que d'antipartícules, tal com ha de contenir el mateix nombre de càrregues elèctriques positives que de càrregues elèctriques negatives. Tanmateix, la matèria que coneixem a la Terra està composta de protons, neutrons i electrons, i no hi ha en ella antielectrons, ni antiprotons ni antineutrons, els quals s'anihilarien ràpidament amb les partícules corresponents.

Algunes de les primeres hipòtesis per justificar la asimetria observada entre matèria i antimatèria consistiren a suposar una separació de matèria i antimatèria en galàxies i antigalàxies. Aquesta explicació té l'inconvenient que no es coneix cap mecanisme que dugui de forma natural a la separació de matèria i antimatèria. Actualment, l'explicació més versemblant es basa en una descoberta de 1964, segons la qual un cert tipus de partícula (K^0) es desintegra amb un ritme lleugerament més ràpid que la seva antipartícula (anti- K^0). Això suggereix un possible mecanisme (suggerit per primer cop per A. Sajarov) per donar lloc a un Univers molt asimètric a partir d'un Univers simètric.

Suposem un Univers inicialment simètric, compost per una mateixa quantitat de certes partícules X i les seves antipartícules anti- X . En desintegrar-se amb ritmes lleugerament diferents, aquestes partícules podrien donar lloc a un Univers amb un lleugeríssim excés de partícules. Així, hi podrien haver, per exemple, 100.000.000 d'antipartícules per cada 100.000.001 partícules. Mentre l'Univers està prou calent, els fotons tenen prou energia com per donar lloc a parelles partícula-antipartícula, que compensen les que havien desaparegut anihilant-se mútuament. Quan la temperatura de l'Univers arriba a ser prou baixa, els fotons ja no tenen prou energia per restaurar les parelles partícula-antipartícula, i aquestes anirien desapareixent ràpidament per anihilació mútua, que deixaria només 1 partícula i 200.000.000 de fotons. Aquest és, precisament, l'ordre de magnitud de la proporció entre fotons i partícules que ens permet de calcular la radiació de fons de microones. Així, la asimetria actual entre matèria i antimatèria seria el resultat d'una lleugeríssima asimetria o, fins i tot, podria seguir-se d'una simetria inicial.

2.5. MATÈRIA FOSCA

Tota la matèria de què hem parlat fins ara està composta per protons, neutrons i electrons, la matèria que coneixem a la Terra. És aquesta, també, la matèria que omple l'espai exterior? Fins a quin punt podem suposar que tot l'Univers està format per la matèria que coneixem? Fins fa relativament poc,

se suposava que era així: les línies espectrals que procedeixen de les diverses galàxies indiquen, efectivament, que els àtoms que les formen són com els de la Terra. Avui, però, s'han anat acumulant indicis que la matèria que coneixem només forma, com a màxim, el 10 % de la matèria de l'Univers. La resta de la matèria, anomenada matèria fosca, és encara un enigma.

Els indicis que duen a especular sobre l'existència de la matèria fosca són els següents:

a) *La velocitat de rotació de les galàxies sobre si mateixes.* Les galàxies giren més ràpidament del que ho permetria el seu contingut de matèria; si només hi hagués la matèria visible, la força centrífuga d'aquesta rotació hauria d'esquinçar les galàxies. Per això, ja des dels anys trenta, se suggerí que hi hauria d'haver molta més matèria que la visible, potser en un factor 10 o més elevat. Aquesta matèria podria estar constituïda, en part, per estrelles nanes i fosques de matèria normal, per forats negres i per petits planetes. Les indicacions sobre rotació de les galàxies sobre elles mateixes, ja advertides el 1930, quedaren corroborades posteriorment per l'observació del moviment de les galàxies dintre dels cúmuls de galàxies, que també manifesten uns valors massa alts en referència al contingut de matèria normal.

b) *L'abundància relativa del deuteri i del liti primordials.* L'abundància d'aquests elements és molt sensible a la densitat d'hadrons a l'Univers; la densitat de barions màxima que es dedueix d'aquesta abundància relativa és tot just una desena part de la densitat total de matèria que prediuen les teories per a l'Univers i que indiquen les dades sobre la desacceleració del ritme d'expansió.

c) *La formació de galàxies.* La formació de galàxies és un procés lent que s'inicià quan l'Univers tenia uns 300.000 anys. Dades recents (1992) sobre petites anisotropies en la radiació de fons de l'Univers (de l'ordre d'uns tres milionèsims de grau) indiquen que les pertorbacions inicials eren tan petites que pràcticament no hi hauria hagut temps de formar galàxies si aquestes s'haguessin d'atribuir només a la matèria. Una de les sortides possibles a aquesta situació problemàtica és suposar que les galàxies començaren a partir d'acumulacions de matèria fosca, la qual, en ser insensible a la interacció electromagnètica, no estava sotmesa a la pressió de radiació que impedia l'acumulació de la matèria i podia, per tant, començar a acumular-se abans.

Les hipòtesis apunten a dos possibles tipus de matèria fosca: matèria fosca calenta, constituïda per partícules molt lleugeres i ràpides (com ara els neutrinos, si tinguessin massa no nul·la), o matèria fosca freda, composta per partícules pesants i lentes. En el primer cas, s'haurien format primer les grans estructures, com els cúmuls de galàxies, els quals s'haurien anat trencant després en estructures més petites, com les galàxies. En el segon cas, el procés

hauria estat l'invers, tot començant per la formació d'estructures més petites que s'haurien anat agrupant per formar estructures grans. Les distribucions espacials de galàxies serien diferents en tots dos casos. Per tal de descriure les distribucions observades, cal, però, una combinació de matèria fosca freda i calenta en unes proporcions determinades, ja que si la massa que manca fos matèria fosca exclusivament freda o exclusivament calenta, el grau d'acumulació de galàxies seria diferent de l'observat.

Alguns autors han proposat que, en lloc de suggerir l'existència d'una gran quantitat de matèria fosca, caldria estudiar la conveniència de canviar la teoria de la gravitació de Newton, tot incloent correccions a llarga distància, correccions diferents, però, de les que provenen de la teoria general de la relativitat. La tendència actual és creure que algun tipus de partícula elemental no conegut fins ara podria ser el constituent d'aquesta matèria fosca. Així, aquests autors evocuen dues situacions trobades en el sistema solar: quan hom descobrí pertorbacions en l'òrbita d'Urà, hom postulà la presència d'un altre planeta i en calculà la posició a partir de la llei de Newton. En aquest cas, postular un nou planeta fou reeixit. En observar les anomalies en l'òrbita de Mercuri, però, hom suposà també l'existència d'un planeta més interior que en seria la causa. En aquest cas, però, no fou aquesta l'explicació definitiva, sinó que calgué trobar-la en una modificació de la llei de la gravetat, deguda, en aquest cas, a la teoria general de la relativitat. Per ara, la situació actual és incerta, tot i que la majoria de físics prefereixen postular un nou tipus de matèria, postulat que ha estat molt fructífer fins ara en la física de partícules elementals. En tot cas, la idea que l'Univers està compost molt majoritàriament per una matèria que fins ara havíem ignorat absolutament és una de les novetats més sorprenents de la física recent.

2.6. LES CONDICIONS D'EXISTÈNCIA DELS ÀTOMS PESANTS

La matèria viva està constituïda, predominantment, per àtoms de carboni, nitrogen, oxigen i hidrogen. Hem vist com les tres primeres menes d'àtoms procedeixen de les estrelles. Un primer examen ens duu a trobar força natural l'existència d'aquests àtoms. Tot i això, un estudi més detallat de les condicions necessàries per a la formació dels àtoms porta a sorpreses considerables. Càlculs detallats posen de manifest que aquests àtoms no existirien si els valors de les constants físiques (com ara la constant de la gravitació, la càrrega o la massa de l'electró, la constant de la interacció nuclear feble...) fossin lleugerament diferents del que són.

Per exemple, si la constant de la gravitació fos lleugerament inferior o lleugerament superior, l'Univers s'hauria expandit massa ràpidament com perquè s'hi haguessin format galàxies, o s'hauria tornat a contreure abans que s'haguessin pogut formar galàxies, estrelles i nuclis pesants. Si la càrrega de l'electró fos lleugerament inferior o superior, la força dels enllaços químics seria inferior o superior al que és, cosa que faria que o bé les molècules formades per aquests elements fossin molt inestables, o bé que fossin massa rígides i sense cap versatilitat. Si la constant d'interacció feble fos més petita o més gran del que és en l'actualitat, les estrelles haurien explotat en una fase molt inicial, sense que hi hagués hagut temps de formar oxigen ni nitrogen. Si no existís un nivell del carboni 12 amb una certa energia molt ben determinada (energia que depèn dels valors de les constants fonamentals), el contingut de l'Univers no hauria passat del carboni, ja que no s'haurien pogut formar àtoms més pesants, l'existència dels quals depèn del pas intermedi basat en l'existència d'aquest nivell energètic nuclear del carboni... L'existència d'aquesta matèria, doncs, depèn de forma sensible d'aquests valors, els quals apareixen en les teories actuals com a paràmetres experimentals, sense justificació teòrica per als seus valors concrets.

Això ha dut alguns autors a formular diferents tipus de principis antròpics. En algunes versions, és un Creador qui imposa aquests valors de les constants per tal que hi pugui arribar a haver vida; en d'altres versions, hi ha un nombre infinit d'universos, amb els valors de les constants físiques donats a l'atzar, i només hi pot haver vida en aquells universos (o en aquelles zones de l'Univers) els valors de les constants dels quals siguin els adients; finalment, hi ha d'altres autors que creuen que hom trobarà una teoria més fonamental que les actuals i que durà a aquests valors de les constants d'una manera necessària. En tot cas, ara per ara, l'existència d'aquests nuclis resulta, com a mínim, una sorpresa i un repte teòric, en lloc de semblar naturalíssima i automàticament obligada.

2.7. PASSAT I FUTUR DE L'UNIVERS

Habitualment, hom estudia més el passat que el futur de l'Univers. Respecte al passat, els models actuals semblen indicar que l'Univers tingué un origen. En els models que no tenen en compte la física quàntica, l'espai i el temps haurien estat creats simultàniament amb l'Univers, de manera que no tindria sentit preguntar-se sobre què passava abans de l'origen de l'Univers. En combinar les idees quàntiques amb la teoria de la gravitació

(combinació necessària en les fases inicials de l'Univers), hom troba la possibilitat que hi hagi un espai-temps preexistent, ocupat per un buit quàntic. Com vam comentar al capítol anterior, el buit quàntic, a diferència del buit clàssic, està poblat per una contínua agitació de parells de partícules virtuals, que es creen i s'anihilen molt poc després.

La durada d'aquestes fluctuacions del buit és fixada per la seva energia: com més gran sigui l'energia de la fluctuació, més curta serà la seva durada. Ara bé, si l'energia de l'Univers fos nul·la, i això és possible si l'energia positiva dels continguts de l'Univers compensa exactament l'energia gravitatòria negativa de la interacció entre els continguts de l'Univers, hom podria imaginar que l'Univers és com una mena de fluctuació en aquest buit quàntic, una fluctuació improbable però de llarga durada. Per això mateix, hom podria imaginar no tan sols un Univers sinó una infinitat d'universos produïts en aquest buit aleatòriament. Això fa pensar en una mena de model estacionari de l'Univers, però a escala molt més gran, una escala en la qual cabrien molts universos que anirien apareixent i desapareixent a l'atzar.

L'estat del buit quàntic, d'altra banda, no és unívoc, i hi pot haver transicions de fase entre diversos estats del buit, les quals poden donar lloc a una expansió molt més ràpida (expansió inflacionària) del que prediu el model estàndard del Big Bang. Aquesta rapidíssima expansió inflacionària permetria d'explicar perquè diferents zones molt allunyades entre si de l'Univers estan exactament a la mateixa temperatura —quelcom que el model estàndard del Big Bang no pot explicar i ha de considerar com a condició inicial donada— o perquè hom no observa monopols magnètics en el nostre Univers, en contra de les prediccions de les teories de partícules elementals segons les quals n'hauríem de trobar una gran quantitat. Els models inflacionaris han protagonitzat en bona part els estudis cosmològics des de 1980. En aquests models, siguin quines siguin les condicions inicials de l'Univers, hom arribaria després de la fase d'expansió inflacionària a unes condicions pràcticament independents de les condicions inicials.

Pel que fa al destí final de l'Univers, depèn crucialment de la densitat de matèria que contingui. Inicialment, l'Univers té una gran energia d'expansió. Aquesta expansió, però, és frenada per l'atracció gravitatòria en el si de l'Univers. Naturalment, com més gran és la densitat de l'Univers més gran és l'atracció gravitatòria i més ràpida és la frenada de l'expansió. Així, si la densitat de l'Univers fos molt petita, la gravitació no tindria prou força com per aturar l'expansió i aquesta prosseguiria indefinidament, mentre que, si la densitat fos prou elevada, l'expansió arribaria a frenar-se i, a continuació, començaria una implosió, que acabaria per comprimir l'Univers en una singularitat calenta. El valor d'aquesta densitat crítica que separa l'Univers en expansió

permanent de l'Univers amb una expansió màxima és de l'ordre de tres nuclis d'hidrogen per metre cúbic. Aquesta densitat és molt més petita que la densitat de la Terra o del Sol, però hem de tenir present que es tracta d'una densitat mitjana de l'Univers, en el qual hi ha grans extensions pràcticament buides que compensen les petites zones d'alta densitat que són les estrelles i els planetes.

La fi de l'Univers depèn crucialment, doncs, de la seva densitat: o bé una expansió indefinida cap a cada vegada més fredor, o bé una nova implosió i un final ardent. En aquest darrer cas, seria possible que, per algun mecanisme que no sabem, l'Univers rebotés i tornés a expandir-se, amb la qual cosa donaria lloc a un Univers cíclic. Diverses vegades en la història, ha estat suposat que l'Univers podria tenir un caràcter cíclic: Empèdocles d'Agrigent atribuïa als cicles una durada d'uns 30.000 anys; la cultura asteca suposa un cicle de destruccions i renovacions de l'Univers...

2.8. CONCLUSIONS

Subratllarem ara aquells aspectes de la cosmologia recent que qüestionen aspectes concrets d'algunes teories filosòfiques sobre la matèria. El materialisme clàssic considerava la matèria com una realitat única i definitiva, eterna. Aquesta visió ha quedat canviada en diversos aspectes importants:

- El materialisme afirmava que la matèria era eterna i indestructible. Ara, però, la cosmologia sembla indicar que la matèria tingué un inici concret.

- El materialisme afirmava la matèria com a realitat necessària. Els estudis recents han posat de manifest com l'existència de la major part d'aquesta matèria és extremament contingent i depèn molt sensiblement dels valors de les constants físiques fonamentals.

- La matèria coneguda que, segons el materialisme, era la sola realitat, passa a ser, com a màxim un 10 % del contingut de l'Univers, el qual podria estar dominat per una matèria fosca, encara desconeguda.

- El destí de l'Univers depèn del seu contingut de matèria, en particular, de la densitat de matèria, de la qual depèn que o bé se segueixi expandint indefinidament, o bé es torni a contreure després d'arribar a una expansió màxima.

- Les lleis físiques tenen una naturalesa peculiar. Hom les podria considerar com a transcendents a l'Univers, és a dir, aquestes mateixes lleis podrien descriure, en principi, universos força diferents dels nostres, si les constants físiques hi fossin diferents. Alguns autors han volgut veure en les lleis bàsiques de la física (lleis que encara no coneixem del tot), la manifestació suprema de

la racionalitat de l'Univers. D'altres autors no hi veuen, en canvi, més que una sèrie de receptes elaborades pels humans per tal d'anar descrivint els elements de la realitat que són capaços d'observar.

En definitiva, la matèria eterna i immutable passa a ser creada o, si més no, a tenir un origen en el temps i a tenir una història plena de dinamisme i de canvis cataclísmics. El temps s'insereix en el fons mateix de la matèria. El futur de l'Univers depèn en part de la matèria.

3. LA MATÈRIA TECNOLÒGICA

L'ús de la matèria

3.1. MATÈRIA, FORMA, ENERGIA

L'intent de conciliar canvi i permanència, unitat i diversitat, donà origen a la idea de matèria elemental o àtoms, que romandrien invariants sota les transformacions dels seus agrupaments diversos. Ací, introduïrem dues altres maneres de cercar quelcom d'invariant rere la diversitat: les formes i les magnituds conservades, en especial l'energia. Trobarem, així, les idees d'estructura i de conservació i degradació de l'energia, que ens duran a reflexionar sobre algunes exploracions actuals sobre la matèria, en el context de les seves aplicacions pràctiques, que condicionen en un grau tan important molts aspectes de la cultura moderna.

Aquest capítol té un punt paradoxal, pel que fa a la seva ordenació en aquest llibre. El fil conductor, fins ara, ha estat la complexitat de la matèria: matèria elemental, àtoms, molècules i cristalls, matèria viva. I, tot i això, la matèria de què parlem ací, en molts aspectes, no hauria existit sense l'existència prèvia de la matèria viva, sense la intel·ligència. Per això, una ordenació estrictament cronològica hauria deixat els aspectes de la matèria tecnològica en darrer lloc, després de la matèria viva. Això mostra com no sempre pot associar-se unívocament increment de complexitat i evolució temporal, i indica també com l'existència de certes formes de matèria pot dependre d'elements que estan més enllà de la matèria estricta.

En els dos capítols anteriors hem parlat de matèria elemental, sense forma, concreta, amb totes les seves potencialitats. En aquest capítol, abordem la complexitat de la matèria i, doncs, la diversitat de formes. Això ens durà, d'una banda, a problemes com matèria i forma o a la relació entre diferents descripcions alternatives de la matèria macroscòpica o a les transformacions de la matèria.

3.1.1. L'ENERGIA

Hi ha hagut intents més abstractes que no pas l'atomisme de buscar l'ésser permanent al fons dels canvis de la realitat. Recordem, en els filòsofs jònics, les especulacions de Pitàgores sobre el paper dels nombres com a essència de la realitat, o les d'Anaximandre sobre l'*àpeiron*. La física, per la seva banda, cerca magnituds que siguin conservades en els canvis diversos. En el segle XVII, Galileu, de manera particular i restringida a moviments circulars, i Descartes amb més generalitat, proposaren el principi d'inèrcia o de conservació de la quantitat de moviment, definida en física com el producte de la massa per la velocitat. Aquesta idea representa una ruptura radical amb la física aristotèlica, la qual requeria una acció contínua sobre els objectes per tal de conservar-ne el moviment.

La constatació de la conservació del moviment fa que en la filosofia de Descartes el moviment sigui una magnitud important, un dels atributs essencials de la matèria, juntament amb l'extensió, que ha estat imposada en la creació del món i que es mantindrà eternament. Sense aquest moviment, la matèria seria estàtica i completament inerta, minvada de possibilitats. La idea de conservació farà, d'altra banda, que s'afebleixi la idea d'un Déu que actua contínuament sobre el món, i hi hagi una tendència a passar a un Déu creador que es desentén del món.

Hauran de transcórrer un parell de segles abans que hom descobreixi una altra llei de conservació universal d'una magnitud física, la llei de la conservació de l'energia, més abstracta encara que la del moviment. La universalitat d'aquesta conservació no fou advertida fins a la meitat del segle XIX, quan R. Mayer i J. Joule proposen, independentment l'un de l'altre i des de punts de vista molt diferents, més metafísic el primer i més experimental el segon, la primera llei de la termodinàmica.

La formulació d'aquesta llei exigeix, en primer lloc, negar la materialitat o substancialitat del calòric, fluid subtilíssim i sense pes que en la teoria química de Lavoisier representava la calor. El model del calòric resultà molt fructífer en la ciència: permeté els primers estudis sobre les màquines tèrmiques, la formulació de les equacions de transport de la calor, la comprensió de detalls quantitatius de la velocitat de propagació del so, i resultava molt intuïtiu. Per això, l'abandonament de la teoria del calòric fou una de les principals dificultats que calgué vèncer en la formulació del principi de conservació de l'energia. En la nova visió, la calor no seria sinó una manifestació de l'energia, de manera que calor i treball serien dues formes diferents d'intercanvi d'energia, la qual, en conjunt, es conservaria.

La constatació de la gran generalitat de la conservació de l'energia fa que ja els primers a treballar aquest concepte (Mayer, Joule, Rankine, Helmholtz, Kelvin, Clausius) tinguin la sensació d'haver tocat un fons important –si no el fons absolut– de la realitat física. Les interpretacions de l'energia seran, però, diverses. Per a alguns autors, es tractarà d'un simple nombre que permet d'establir correlacions entre sèries d'esdeveniments i les regles de mesura o càlcul del qual estan ben establertes, i insistiran en què l'energia no introdueix cap entitat nova en la naturalesa. Altres autors, com Rankine, sentiran la temptació d'arribar a atribuir una certa substancialitat a l'energia i de considerar-la com la base autèntica de l'ésser. D'altres, en fi, veieren l'energia com una expressió de les potencialitats de la matèria, que conferia a aquesta un caràcter ple de dinamisme, en oposició al caràcter inert i feixuc que sovint se li atorga.

L'energia és, de fet, una capacitat de produir canvis, i pot manifestar-se de maneres molt diverses (cinètica, potencial gravitatòria, potencial electrostàtica, potencial elàstica, magnètica, química, energia de massa en repòs, tèrmica...), però la seva suma total es conserva. Els energetistes arribaren a proposar un retorn a la teoria de les qualitats, per tal de descriure les diverses transformacions d'aquest nombre constant en el procés. Les partícules apareixen i desapareixen, canvien d'identitat, però l'energia, tot i canviar de forma, es conserva quantitativament. Per això, alguns autors volgueren identificar l'ésser parmenidià amb l'energia, més que no pas amb les partícules de la matèria.

A finals del segle passat, aquesta tendència energeticista fou tan intensa que bastants científics negaren els àtoms, els quals no semblaven necessaris per tal d'afirmar la persistència de l'ésser. Les polèmiques entre els energetistes (Mach, Ostwald) i els mecanicistes atomistes (Boltzmann, per exemple) tingueren una gran intensitat. Altres autors no negaren, en canvi, les partícules atòmiques, però en veure-les participants de l'energia, atribuïren a aquesta una evidència de les potencialitats de la matèria.

Des de llavors, i malgrat alguns episodis de dubte, segons els quals l'energia s'hauria conservat només en mitjana però no necessàriament en cada procés atòmic particular, la conservació de l'energia ha dut, en alguns casos, a prediccions completament noves, com la del neutrino per part de Pauli. Aquesta partícula sense càrrega i de massa molt petita o nul·la fou postulada per tal d'explicar la conservació de l'energia en la desintegració beta, de manera que l'esmentada partícula s'endugués l'energia que no s'enduien els electrons alliberats pel nucli, l'energia dels quals era molt variable. La descoberta d'aquesta partícula, uns vint anys després de la seva predicció, suposà una nou èxit de la convicció en la conservació de l'energia.

Admetem, però, que l'energia sigui una de les constants de l'Univers, potser la constant essencial de l'Univers. No resultaria torbador saber, segons la cosmologia recent, que potser l'energia total de l'Univers és nul·la? L'energia de la massa, positiva, podria estar compensada exactament per l'energia atractiva de la gravitació, com ho hem fet notar en el capítol anterior. Efectivament, la física considera negatives les energies relacionades amb les forces atractives en general. No seria sorprenent i irònic que, un cop trobada una referència sòlida de permanència, aquesta fos nul·la?

3.1.2. LES FORMES

Fins ara, havíem vist la matèria com a element bàsic i permanent, sota una successió de formes més o menys efímeres. Però les formes, si bé són efímeres en cada ésser concret, poden ser més permanents que la matèria des de dos punts de vista: o bé per la seva multiplicitat (agregats d'àtoms diferents; per exemple, dos cristalls, dos gossos, dos arbres tenen la mateixa forma, independentment dels àtoms concrets que les constitueixen), o bé per la seva permanència enfront del trànsit de la matèria que les constitueix temporalment (per exemple, la forma d'un remolí, constituïda per un trànsit d'aigua, o un cos viu, constituït per un trànsit d'aliments, o un país, constituït per generacions que es van succeir). Paradigmes d'aquests dos tipus diferents de formes en el món físic són, respectivament, els cristalls i les estructures dissipatives.

Aquesta revolució del punt de vista sobre la matèria dugué Plató a postular la forma com a realitat més durable i profunda que la matèria, i a postular l'existència d'unes idees o formes pures, més enllà de la matèria, que serien el referent etern de les formes percebudes pels nostres sentits i a les quals arribaríem pel pensament. Aristòtil destacà per les precisions subtils i durables referents a matèria i forma. Si per a Plató les formes concretes eren la manifestació d'una idea o forma arquetípica més reals que les pròpies formes dels objectes concrets, per a Aristòtil cal refusar la «separació de les formes», i no es pot dir que existeixin formes realment separables i independents de la matèria en què estan impreses. Així, totes les realitats d'aquest món són individus l'essència dels quals és ésser «formes» en una matèria. L'ànima seria la forma del cos vivent. Hi podria haver, també, unes «substàncies separades», formes pures independents de la matèria, entre les quals hi hauria la forma primera o primer motor, pensament que es pensa a si mateix, i que seria Déu. Per a Aristòtil, la matèria esdevé una de les quatre causes (material, formal, eficient i final) de les coses i, més que constituir una realitat en si mateixa,

esdevé una relació: una cosa no és matèria per ella mateixa, sinó matèria en relació amb una altra cosa. Així, la pedra és matèria d'una escultura o la paraula és matèria per a una frase o una proesa és matèria per a un poema èpic.

La ciència moderna ha transposat alguns aspectes de la teoria de les formes a la consideració de les estructures físiques i ha dedicat un esforç considerable, recentment, a l'estudi de formes complexes i a la mesura de llur complexitat. Algunes de les formes més ben definides són els cristalls: estructures repetitives d'àtoms o de molècules. En els cristalls, tant la matèria com la forma representen una permanència prolongada, i és la multiplicitat d'éssers concrets amb una mateixa forma la que sorprèn. Un altre tipus d'estructures, les anomenades estructures dissipatives, són, en canvi, estructures obertes i fora de l'equilibri, i en les quals l'estructura és més permanent que la matèria però requereix una aportació contínua d'energia. Un remolí en un riu, per exemple, té una forma fixa, però l'aigua que el forma va variant contínuament.

També en els éssers vius, la forma és el permanent i la matèria el transitori, a diferència del punt de vista atomístic, que privilegiava la matèria elemental com a permanent i la forma com a efímera. En els ens artificials, com ara un martell o una destal, és més important la forma que la matèria concreta, ja que importa més la funció que el material concret que compon el material. En els ens vivents, com ara el cos dels animals o de les persones, la matèria hi és passatgera; de fet, les cèl·lules que componen el nostre cos canvien cada pocs dies, de manera que el cos sencer, excepte les neurones, està compost per material completament diferent cada sis o set mesos. I, rere aquesta mudança material, és la forma la que perdura. No és d'estranyar que la forma, element principal de permanència del nostre individu, fos relacionada amb l'ànima.

3.1.3. EL CANVI

En parlar d'àtoms o d'energia o de formes, hem insistit en la recerca de permanència i unitat. Ara bé, cal no oblidar que altres punts de vista han insistit en el paper essencial del canvi. No caldria, segons aquesta perspectiva, cercar res de permanent sota els canvis. A més de les idees clàssiques i obscures d'Heràclit, altres interpretacions de la realitat han dut a afavorir la mudança i el canvi com a manifestació més profunda de la realitat que no pas una hipotètica essència immòbil i permanent.

El materialisme dialèctic, tan en voga fa unes dècades, per exemple, transposa al camp de la matèria el dinamisme (tesi, antítesi, síntesi) que Hegel havia ideat per a l'esperit. En aquesta teoria filosòfica, la matèria està molt

mal definida (incorpora tant els àtoms com la realitat social, els sistemes de producció i les ideologies), i s'interpreta el moviment com essència de la realitat. Atrets tant per les ciències socials com per les ciències de la naturalesa, els materialistes dialèctics cregueren que, ja que tot és matèria i ja que les relacions socials són l'exponent més complex i sofisticat de la matèria, hom podria descobrir en les lleis de les relacions socials les lleis més profundes i autèntiques de la naturalesa. L'intent de descriure amb unes mateixes lleis naturalesa i societat no és pas exclusiva del materialisme dialèctic, sinó que també pot ser trobada, tot i que expressada amb menys optimisme pel que fa a la immediatesa d'aconseguir-ho, en la ciència moderna. Ara bé, en aquesta, hom pretén comprendre primer les lleis dels sistemes més simples (físics, biològics moleculars, zoològics, poblacions de complexitat creixent...) i aplicar-ne després el que es pugui a les societats humanes, més que no pas procedir a la inversa i intentar deduir les lleis de la matèria a partir de les lleis de la societat, com en el materialisme dialèctic.

3.2. ENTROPIA: DEGRADACIÓ, INFORMACIÓ, DIVERSITAT

3.2.1. LA SEGONA LLEI DE LA TERMODINÀMICA

Tot i la seva conservació, l'energia no s'intercanvia en qualsevol sentit. Així, l'energia tèrmica en un sistema aïllat només pot anar des d'objectes calents a objectes freds, però no a l'inrevés. Anàlogament, hom pot transformar íntegrament treball en calor però no calor en treball. Aquestes dues observacions constituïren els primer enuncisats de la segona llei de la termodinàmica, formulats respectivament pel berlinès Rudolf Clausius i per l'escocès William Thomson, Lord Kelvin, el 1850. Tots dos fan notar que l'energia, tot i conservar-se en quantitat, va degradant-se en qualitat, pel que fa a les possibilitats d'aprofitament. Així, per exemple, si hom té una font tèrmica a 300 graus i una a 200 graus, hom en pot extreure una certa quantitat d'energia, tot utilitzant aquestes fonts per fer funcionar una màquina tèrmica. Ara bé, si hom disposa, en canvi, de dues fonts a la mateixa temperatura, per exemple, a 250 graus cadascuna, no pot extreure'n treball, a no ser que pugui disposar d'un tercera font a temperatura més baixa que les anteriors. Per aquest motiu, l'energia no és exactament la capacitat de fer treball, ja que en aquest segon cas tenim una certa quantitat d'energia interna dels sistemes que no pot ser transformada en treball.

La segona llei de la termodinàmica, establerta inicialment mitjançant els enuncisats qualitius esmentats en el paràgraf anterior per Clausius i Kelvin, rebé una formulació quantitativa mitjançant la llei de l'increment de l'entropia, magnitud 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, en sistemes aïllats, només pot augmentar o romandre constant, però no disminuir, i dona un sentit a la fletxa del temps. Com més gran l'increment d'entropia, més notable la degradació de l'energia.

L'entropia té un estatus lògic semblant al de l'energia: és una magnitud numèrica, funció d'estat, les relacions quantitatives per a la mesura de la qual estan ben fixades en cada cas, i que serveix, no per classificar sinó per ordenar sèries d'esdeveniments. Com que l'entropia no roman constant, sinó que augmenta, no hi ha hagut gaires temptacions de substantivitzar-la, a diferència del cas 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 forma ineluctable a una mort tèrmica de l'Univers en què, homogenia ja la temperatura d'aquest, no hi hauria cap possibilitat d'extreure'n treball útil.

Un pas important en la interpretació de l'entropia fou la seva identificació en termes del desordre molecular per part de Ludwig Boltzmann, el 1872. Segons aquest científic, l'entropia és una mesura del desordre molecular i per això només pot créixer, però no disminuir, en sistemes aïllats. 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, tindria una entropia elevada. Cal subratllar que els estats d'equilibri, els de màxima entropia possible en un sistema aïllat, serien els més desordenats, en contrast amb la nostra tendència intuïtiva a identificar equilibri i ordre. La mesura del desordre, en aquesta teoria, es fa a través del nombre de microestats (és a dir, de configuracions microscòpiques o assignacions concretes de posicions i velocitats al conjunt de molècules) compatibles amb un macroestat donat del sistema (caracteritzat tan sols per uns pocs paràmetres macroscòpics, com ara la quantitat de matèria, la temperatura i la pressió).

L'afirmació d'un increment del desordre, gairebé contemporània de la formulació de la teoria de l'evolució per part de Darwin, contrastava amb aquesta, la qual constata que l'estructura i l'ordre dels sistemes vius creix amb el temps. Aquesta aparent discrepància –increment del desordre en els sistemes físics, increment de l'ordre en els sistemes biològics– 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 semblava implicar una degradació de l'estructura de la matèria 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. Així, per exemple, en nodrir-nos ingerim substàncies de molècules llargues, de baixa entropia, i excretem molècules curtes, el conjunt de les quals té més possibilitats de desordre i, per tant, més entropia. Així, en el procés alimentari incrementem l'entropia de l'entorn i podem, si cal, reduir la nostra. Quelcom de semblant s'esdevé amb el planeta Terra, el qual emet vint vegades més fotons dels que rep (ja que la Terra es troba a una temperatura absoluta d'uns 300 kèlvins, vint vegades més baixa que la temperatura de la superfície solar, d'uns 6.000 kèlvins). Com que l'entropia és més gran com més gran és el nombre de fotons en què es troba distribuïda l'energia de la radiació, la Terra emet més entropia de la que rep i fa augmentar així l'entropia de l'Univers.

Més recentment, cap a finals dels anys seixanta, s'han començat a comprendre alguns dels detalls de com es pot anar generant l'ordre en sistemes prou allunyats de l'equilibri. Els treballs de Turing sobre morfogènesi en sistemes bioquímics, o els de Prigogine sobre termodinàmica de processos irreversibles, o els de Haken sobre la sinèrgica o comportament autoorganitzatiu de sistemes lluny de l'equilibri han suposat progressos molt importants en aquesta línia. La idea essencial és la de 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 sigui el ritme de producció de molècules de l'esmentada espècie), el qual tendeix a incrementar les inhomogeneïtats, i un factor homogeneïtzador (com ara la difusió, que fa que les molècules tinguin tendència a passar des de les zones de concentració més gran a les de concentració més petita i tendeixin, així, a igualar el valor de les concentracions arreu del sistema). Prou 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.

3.2.2. INFORMACIÓ, DIVERSITAT

Vers 1945, Shannon, un enginyer de la companyia Bell Telephones, s'interessà en la mesura de la informació, per tal de millorar al màxim possible la transmissió de senyals telefònics o telegràfics. Per aconseguir-ho, defineix un nou paràmetre: la quantitat d'informació continguda en un missatge, relacionada amb la disminució d'incertesa que es produeix en la

recepció del missatge. Es tracta d'una mesura abstracta que no té res a veure amb el significat del missatge concret. Shannon estudia, a partir d'aquest concepte, quina de les diverses possibles codificacions d'un missatge (morse, binari, analògic, diversos codis secrets) és menys vulnerable als sorolls introduïts durant la transmissió, o pot transmetre més informació en una quantitat mínima de temps o de senyals. Dels missatges amb codificacions tecnològiques passa després als missatges de les llengües usuals. Les seves expressions li permeten, per exemple, de mesurar el grau de redundància que tenen tots els llenguatges pràctics, redundància que actua com a defensa respecte a les perturbacions introduïdes pels sorolls diversos.

Les expressions de Shannon per a la quantitat d'informació d'un missatge resultaren molt semblants a la de l'entropia de Boltzmann. Fou Brillouin el primer que ho féu notar, i el primer a tenir en compte en física el cost energètic no nul de la informació. Així, la física clàssica, per la qual no hi havia límit mínim en la interacció, negligia, per exemple, el paper de l'intercanvi de radiació electromagnètica (llum, per exemple) necessari per dur a terme una determinada observació. En tenir en compte que l'observació d'un determinat objecte implica un cert quàntum d'energia (corresponent a un fotó d'una longitud d'ona relacionada amb el màxim d'emissió de l'espectre de la llum a la temperatura de l'ambient en què s'efectua l'observació), Brillouin fou capaç de trobar una sortida airosa i prou satisfactòria —tot i que no completament definitiva— a algunes paradoxes que havia plantejat la segona llei, com la del dimoni de Maxwell. Aquest ésser ideal és capaç de violar la segona llei, tot deixant passar a través d'un envà les molècules més ràpides en un sentit i les molècules més lentes en un altre sentit fins que separa les primeres (que constituïrien un gas calent) de les segones (que constituïrien un gas fred). Així, hom hauria aconseguit fer fluir calor d'un sistema fred a un de calent sense haver fet (si ignorem la física de la informació) cap treball, cosa que violaria l'enunciat de Clausius de la segona llei. Ara bé, si tenim en compte la despesa energètica que caldria per tal que el dimoni de Maxwell pogués adquirir informació sobre la velocitat i la posició de les molècules que se li acosten, hom troba que l'energia consumida en aquesta adquisició d'informació no és arbitràriament petita, ans és compatible amb les restriccions de la segona llei.

Amb la combinació dels conceptes d'entropia i d'informació, s'ampliava molt el domini d'aplicació de les idees d'entropia. En biologia, per exemple, idees d'aquesta mena han estat utilitzades per tal d'avaluar la diversitat d'ecosistemes i el seu increment al llarg de l'evolució, punts en què ha destacat la contribució del professor Ramon Margalef. Economia, sintaxi, enginyeria de comunicacions són altres camps on aquestes idees han estat també utilitzades.

3.2.3. DESCRIPCIÓ MICROSCÒPICA I DESCRIPCIÓ MACROSCÒPICA

La introducció dels conceptes d'energia i entropia i les pugnes de l'energetisme amb l'atomisme ens porten a considerar la qüestió de possibles descripcions alternatives de sistemes compostos per molts àtoms. Una d'elles s'enfronta directament amb el sistema global, macroscòpic, i assaja de caracteritzar-ne les propietats i de relacionar-les entre elles; energia i entropia en són dues magnituds característiques. Una segona descripció consisteix a explicar les propietats del conjunt a partir dels àtoms i llurs interaccions.

En física, la primera descripció està relacionada amb la termodinàmica i la segona amb la mecànica estadística. La termodinàmica és capaç d'arribar a resultats generals independents de la matèria concreta. Un dels més coneguts és la fórmula de Carnot per al rendiment màxim d'una màquina tèrmica reversible, que està relacionat amb les temperatures absolutes de les fonts tèrmiques però que és completament independent dels materials que treballin en la màquina; aquesta independència respecte al material és un dels atractius de la termodinàmica. Altres resultats es refereixen a relacions entre propietats macroscòpiques de la matèria (calor específica a pressió constant, a volum constant, compressibilitat isotèrmica, etc.), relacions completament generals, independents dels valors concrets d'aquests coeficients per a cada material determinat. Si insistim en què els àtoms, o les partícules microscòpiques que componen el sistema, són la darrera realitat, podríem donar primacia a aquesta segona descripció i intentar explicar el «superior» a partir de l'«inferior», per reprendre paraules d'Auguste Comte. Si suposem que la sola diferència entre el macroscòpic i el microscòpic és la dificultat matemàtica deguda al fet de tenir moltes partícules, estarem advocant per un reduccionisme, tipus de pensament que, si més no metodològicament, ha dominat, pràcticament, la ciència del nostre segle.

El reduccionisme nega legitimitat pròpia, a no ser que sigui als efectes exclusivament pragmàtics de comoditat pràctica, a la descripció purament macroscòpica. Hom pot admetre, per contra, que el pas de les parts al conjunt no és simplement quantitatiu, sinó també qualitatiu, amb lleis i fenomenologies noves, amb propietats emergents que no eren presents en les parts per separat. Per exemple, la noció de temperatura o les nocions d'estat sòlid, líquid o gasós són completament alienes als àtoms i només pertanyen amb propietat al conjunt d'ells. Tant en la física de les partícules elementals com en la biologia molecular, el reduccionisme ha estat una de les guies i forces motrius. El nostre final de segle està mitiganant el reduccionisme i comença a admetre la legitimitat de diversos nivells de descripció de la matèria, cadascun

dels quals podria, en principi, relacionar-se tant amb els més bàsics com amb els més pràctics, sense, però, haver de buscar en ells la seva legitimació. Així, hi hauria tant una exploració per nivells separats, com un estudi del pas de nivells inferiors als superiors i dels superiors als inferiors. Fins a quin punt aquest punt de vista està admès en la comunitat científica és encara problemàtic i dona lloc, de vegades, a disputes aferrissades entre els partidaris del reduccionisme i els qui admeten diversos nivells de realitat.

3.2.4. ELS ESTATS DE LA MATÈRIA

La diversitat del món no s'expressa tan sols en les diferències de materials, ans també en els diversos estats o fases en què un material donat pot trobar-se. L'aigua, per exemple, pot ser trobada en els estats sòlid (glaç), líquid o gasós (vapor). Pel que fa als estats macroscòpics d'agregació de la matèria, la panoràmica cada vegada és més rica i variada: als estats sòlid, líquid i gasós usuals, hom hi afegeix estats extrems, com el plasma. En aquest estat, la matèria es presenta com un gas fortament ionitzat; el llarg abast de les interaccions electrostàtiques fa que aquest gas presenti un comportament fortament col·lectiu, amb característiques peculiars que no presenten els gasos usuals. En aquest estat es troba quasi tota la matèria que constitueix l'univers conegut: els gasos de les estrelles i els gasos dels buits interestel·lars i intergalàctics. Tan sols en els planetes hom troba els estats a què estem acostumats. Pel que fa a les estrelles, habitualment en estat de plasma, poden arribar-se a trobar en estats molt més exòtics. L'exemple més interessant el constitueixen les estrelles de neutrons, objectes de densitat elevadíssima (de l'ordre de milers de tones per centímetre cúbic) en els quals els electrons han caigut sobre els protons i han donat lloc a neutrons, per mitjà de la interacció nuclear feble.

A més d'aquestes situacions extremes, hom ha anat trobant estats intermedis de gran interès. Un dels exemples més destacats és el dels cristalls líquids, constituïts per molècules allargades rígides, que exhibeixen, d'una banda, un ordre orientacional molt notable, característic dels cristalls, mentre que tenen un desordre posicional i una mobilitat característiques dels líquids. Els cristalls líquids han suposat una revolució en la tecnologia de pantalles indicadores, donada la sensibilitat de les seves propietats òptiques a petits camps elèctrics aplicats, i són l'estat de la matèria en què es troben les membranes biològiques. L'estudi dels polímers, materials constituïts per molècules allargades i flexibles, entre les quals trobem les diverses fibres, la pràctica totalitat de les

molècules d'interès biològic, les pintures... o l'estudi de la matèria granular (sorra, arròs, blat...) constitueixen un altre camp que ha vist en els darrers anys un increment d'esforços tant a nivell teòric com a nivell d'aplicacions.

Cal tenir present, a més, que les fases de la matèria són més subtils que el que indica el seu estat d'agregació. Així, alguns materials (metalls, ceràmiques) poden trobar-se en diverses fases sòlides amb propietats molt diferents. A temperatures superiors a una certa temperatura crítica, els metalls són conductors habituals de l'electricitat i presenten una certa resistència al pas del corrent elèctric. A temperatures prou baixes, però, la seva resistència disminueix bruscament i s'anul·la; tenim aleshores un superconductor, material d'interès enorme, ja que permet transportar corrent sense cap pèrdua d'energia deguda a escalfaments. Aquest estat de la matèria fou descobert el 1911 a Leiden per Kammerling Onnes i ha despertat des d'aleshores un gran interès. El 1986, la recerca en aquest camp rebé un impuls espectacular quan Bednorz i Müller, a Zuric, trobaren nous materials (no metalls sinó òxids ceràmics) en què la temperatura crítica (que per als metalls és inferior als 250 graus sota zero) era de l'ordre dels 235 graus sota zero. Començà una frenètica cursa que dugué en pocs mesos al descobriment de materials la temperatura crítica dels quals era cada vegada més elevada, fins que se situà al voltant dels 135 graus sota zero, temperatura que permet, en principi, una utilització industrial molt més còmoda i àmplia que la dels antics superconductors clàssics.

Igualment, la matèria sòlida pot presentar diverses fases, caracteritzades o bé per cristallitzacions diferents o bé per propietats magnètiques diferents. Així, cal distingir, per exemple, entre fases ferromagnètiques, amb imantació no nul·la en absència de camps magnètics exteriors, i fases paramagnètiques, que només presenten imantació en presència d'un camp magnètic extern però no pas magnetització espontània, o bé les fases diamagnètiques, que responen davant un camp magnètic extern tot produint una imantació que disminueix el valor d'aquell camp. Pel que fa als líquids, la fase més espectacular a baixes temperatures (de l'ordre de 270 graus sota zero) és la superfluïdesa de l'heli 4, estat en què el fluid pot fluir al llarg de capil·lars diminuts amb viscositat nul·la, o presenta una elevadíssima conductivitat tèrmica. La mecànica quàntica ha jugat un paper essencial en la comprensió d'aquestes fases. En l'actualitat, un dels reptes més importants de la física de materials és fornir una teoria que compregui els nous materials superconductors, als quals la teoria de Bardeen, Cooper i Schrieffer de 1952, que descriu recixidament els superconductors metàl·lics, no és aplicable.

3.3. PERSPECTIVES SOBRE MATÈRIA, TECNOLOGIA I CANVI CULTURAL

La ciència de materials és una de les branques de la ciència que, actualment, rep més ajuts i més atenció, i que estableix les fronteres de la recerca i del coneixement de la matèria a escala macroscòpica. Ocuparia moltes hores donar una perspectiva dels estudis actuals en ciència de materials, i la multiplicitat d'informació ens desviaria massa del nostre propòsit més conceptual de reflexionar, en termes generals, sobre la matèria. De fet, una de les activitats que permet de distingir els humans dels animals és la seva capacitat d'elaborar instruments amb finalitats diverses. Els animals o bé no usen instruments, o bé els prenen directament de la naturalesa. La utilització d'aquests instruments suposa una certa forma i una certa matèria, i l'interès per la matèria, per la seva manipulació i ús, ocupà un paper important en l'activitat humana des de molt antigament.

En els períodes més antics, la matèria és natural i sense elaboració (les edats de la pedra), i la diferenciació s'estableix per la forma: pedra tallada en el paleolític, pedra polida en el neolític. La utilització d'un material més elaborat, en concret el bronze, posa fi al neolític. A partir d'aquest moment, les civilitzacions passen a dependre de manera important dels materials utilitzats. La duresa superior del ferro, per exemple, farà que les primeres civilitzacions capaces d'utilitzar aquest material s'imposin a les civilitzacions només capaces d'utilitzar el bronze. El xoc d'una espasa de ferro contra una de bronze, amb la consegüent ruptura de la darrera espasa, és una de les imatges més antigues que ens fan veure com els materials a l'abast tenen un paper considerable en definir una civilització.

A partir d'aquesta constatació, els materials que componen els terrenys definiran, també, el valor del territori. Començaran les lluites per la possessió de les zones riques en minerals aprofitables. La matèria començarà a tenir un valor atribuït, aliè a la pròpia matèria. Amb els instruments, començarà la voluntat de transformar el món, transformació que suposarà una lenta millora tant en el disseny de les formes dels instruments com en l'elaboració i sofisticació dels materials.

Tractarem ací tres aspectes de la matèria tecnològica: l'energia, la informació i la degradació. Es tracta de tres punts centrals en les preocupacions actuals. Per això, ens limitarem ací a estudiar tres tipus de matèria: els combustibles, les noves tecnologies de tractament d'informació i la contaminació. Aquests tres problemes configuren tres grans reptes de la nostra civilització.

3.3.1. L'ENERGIA: ELS COMBUSTIBLES

El concepte d'energia ha estat ràpidament assimilatat per la societat com a capacitat de fer, d'actuar, i ha passat a ser un dels termes més usats. Els problemes energètics ocupen un lloc molt important en la societat d'avui. La disponibilitat d'energia és un dels indicadors d'un fractura molt considerable, sovint tràgica, entre diverses parts de la humanitat: un món avançat amb considerables capacitats energètiques i un món subdesenvolupat, amb escassa disponibilitat energètica.

Tot i això, el món industrialitzat prengué consciència de la precarietat de les seves disponibilitats energètiques quan, el 1973, com a conseqüència de la guerra araboisraeliana, els països productors de petroli limitaren els subministraments de petroli en represàlia pel suport occidental a Israel. S'intensificaren extraordinàriament els estudis de com millorar el rendiment energètic dels combustibles fòssils, com detectar i explotar nous jaciments i com desenvolupar alternatives energètiques. La intensitat d'aquesta recerca disminuí molt considerablement quan el 1986 el preu del petroli inicià una davallada considerable.

3.3.1.1. *Combustibles fòssils*

Petroli, carbó, gas natural són combustibles fòssils, formats fa uns 150 milions d'anys a partir de residus biològics i no renovables. Des del punt de vista de la recerca actual, alguns problemes relacionats amb l'explotació del petroli es refereixen a l'exploració i explotació de nous jaciments, en circumstàncies que suposen reptes i riscos nous. L'explotació del petroli submarí al Mar del Nord, iniciada activament el 1969 amb la descoberta d'un gran jaciment de petroli i de gas natural al centre del Mar del Nord, suposà un estímul important per al desenvolupament de les tècniques d'enginyeria marina, per tal de construir les plataformes extractores, o de les prospeccions geològiques, basades ja sigui en mètodes de prospecció sísmica o per anàlisi de dades subministrades per satèl·lits.

Altres problemes més concrets es refereixen als estudis del diagrama de fases a les pressions i temperatures més elevades a què es troben els nous jaciments (fins ara, els jaciments es trobaven a una profunditat inferior als 4.000 m, però la necessitat de més combustible ha fet que s'hagi d'explorar a més profunditat, fins que s'ha arribat, actualment, a uns 5.300 m). A aquestes temperatures i pressions, ja no podem distingir entre sòlid i gas (ens trobem per sobre del punt crític) i es presenten nous problemes termodinàmics. D'altra

banda, l'exploració dels antics pous de petroli no era exhaustiva. Hom calcula que aproximadament un 40 % del petroli queda en intersticis i porus de les roques. Per extreure aquest petroli hom ha pensat a introduir aigua a pressió que desplaçés aquest petroli intersticial. Això, però, és difícil, ja que donades les diferències de tensions superficials i de viscositats del petroli i de l'aigua, la impulsió del petroli per part de l'aigua és extremament inestable i ineficaç. Per això, hi ha investigadors explorant com extreure aquest petroli.

La limitació de recursos energètics del nostre planeta estableix un vincle temporal entre les generacions successives: el petroli, el carbó, el gas, els recursos no renovables que es cremin ara són recursos que s'estan sostraint a les generacions posteriors. Per això, s'imposa la recerca de nous recursos que siguin o bé renovables (energia solar, energia eòlica) o bé no renovables però abundants i amb un gran contingut energètic (energia nuclear). Evidentment, les qüestions sobre el valor dels materials energètics es posen avui amb especial acuitat.

3.3.1.2. *Combustibles nuclears*

Les grans quantitats d'energia alliberades en les reaccions nuclears (la combustió nuclear d'un gram d'urani 235 allibera tanta energia com la combustió de quatre tones d'hulla) estimularen, des de finals de la segona guerra mundial, la utilització d'aquestes reaccions per aconseguir energia. Els factors polítics tenen un pes molt important en el grau d'implantació d'aquestes centrals: França és el país capdavanter i el 70 % de la seva producció d'electricitat és d'origen nuclear. A Alemanya aquest percentatge és del 34 % i creix lleugerament. Anglaterra és el tercer país en què encara es construeixen centrals nuclears. En altres països europeus, les pressions polítiques han dut bé sigui al tancament de centrals bé sigui a la congelació dels programes nuclears.

Hi ha dos tipus de reaccions nuclears: les de fissió, en què un nucli gran es trenca en dos de petits amb alliberament d'energia, o bé les de fusió, en què dos nuclis petits s'uneixen per formar-ne un de més gran. Les centrals nuclears actuals són centrals de fissió. El combustible bàsic és l'urani. Aquest es presenta en dos isòtops l'U-238, majoritari, i l'U-235, el susceptible de fissió, i que només forma un 0,7 % del contingut dels jaciments. Un dels problemes tècnics és, doncs, enriquir l'urani en U-235, ja sigui en cambres de difusió, en centrifugadores o mitjançant mètodes molt recents basats en la ionització selectiva dels isòtops mitjançant un làser convenientment sintonitzat.

Una via prometedora en el camp de la fissió és la fabricació de reactors reproductors. Quan neutrons ràpids xoquen contra l'U-238 produeixen plutoni Pu-239, el qual és tan susceptible de fissió com l'U-235. Una manera de poder incrementar la durada del combustible seria, doncs, aconseguir que la quantitat de Pu-239 produït en el reactor fos prou gran com per anar suplir l'U-235 perdut en la reacció. Per a això, cal que els neutrons que prenen part en la reacció siguin prou ràpids. Així, no es pot utilitzar l'aigua com a refrigerador, sinó que cal utilitzar nuclis més pesants. Un refrigerant adient ha resultat ser el sodi líquid. El 1986 s'obria a França la central nuclear Superphenix basada en un reactor autoreproductor ràpid, i hi ha un projecte europeu (en què intervenen França, Alemanya i Anglaterra) per al desenvolupament d'un reactor semblant però més gran.

Una de les solucions més prometedores a llarg termini és la fusió nuclear. Les reaccions de fusió donen una gran quantitat d'energia, a partir de la pèrdua de massa subsegüent. En la fusió nuclear, dos nuclis lleugers s'uneixen per donar lloc a un nucli més pesant (per exemple, deuteri i triti donen heli 4 més energia). Aquesta darrera reacció té l'avantatge de tenir un combustible més abundant, un rendiment més elevat i uns detritus de vida més curta que els de la fissió nuclear. La quantitat d'energia extreta per unitat de massa de la matèria és més elevada que en la fissió. Per aconseguir un ritme rendible de fusió nuclear cal assolir temperatures molt elevades (uns cent milions de graus, deu vegades més que al centre del Sol) per tal que els nuclis positius, que es repel·leixen electrostàticament, puguin arribar a situar-se a una distància prou curta com perquè comencin a interaccionar mitjançant la interacció nuclear forta. Per poder mantenir confinat el plasma cal utilitzar camps magnètics molt intensos, ja que cap paret material no podria resistir les temperatures de l'ordre de desenes de milions de graus.

Per tal que l'energia alliberada per la reacció compensi l'energia despesa per escalfar el plasma i produir els camps magnètics que el confinen, cal que el producte de la temperatura T per la densitat n pel temps τ que dura la configuració superi un cert valor crític, condició anomenada criteri de Lawson (i que per al deuteri-triti val $nT\tau > 5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$). Diversos processos hidrodinàmics o microscòpics fan que confinar un plasma calent sigui molt difícil, de manera que els temps de confinament són molt breus. Els esforços europeus s'han concretat, especialment, a part de diversos centres estatals, en el projecte JET (Joint European Torus), aprovat el 1978, i que inicià el seu funcionament el 1983. El novembre de 1991 el JET, poc abans d'expirar el termini previst, anunciava que havia obtingut una quantitat considerable d'energia i insistia que es prenguésseriosament la continuació del projecte en la seva segona fase, NET (Next European Torus).

Alguns dels problemes actuals consisteixen en l'acció dels neutrons sobre les parets, que n'afebleix molt els materials i els pot tornar radioactius i fràgils. Un altre problema es refereix a les impureses que, procedents de l'evaporació de les parets, entren en el plasma i li fan perdre energia. Per evitar aquest problema s'ha substituït el recobriment de les parets interiors, anteriorment fet de carboni, per parets de beril·li, de pes atòmic més petit, i que contribueix menys al refredament. Una idea en pla de desenvolupament és produir configuracions magnètiques prop de les parets que tendixin a endur-se les impureses iòniques vers certs desguassos per on són extrems del recipient, o tokamak.

Així, el paper de la matèria primera queda minimitzat, i el més important és la tecnologia afegida, el saber afegit. Amb una quantitat petita d'una matèria molt abundant s'aconsegueix una gran quantitat d'energia.

TAULA 7. *Principals fites en l'estudi de les reaccions nuclears*

1932	Chadwick (Cambridge) descobreix el neutró
1934	Fermi (Roma) fabrica per primer cop nuclis artificials, per bombardeig de nuclis amb neutrons lents
1938	Hahn i Strassman (Berlín): primera fissió artificial d'un nucli d'urani
1939	Fermi i Szilard (Chicago): comencen els estudis per aconseguir una reacció nuclear en cadena
1942	Fermi (Chicago): primer reactor nuclear
1945	16 juliol, primera explosió nuclear (^{239}Pu) al desert d'Alamogordo; 6 agost, Hiroshima (^{235}U); 9 agost, Nagasaki (^{239}Pu)

TAULA 8. *Algunes reaccions nuclears*

<i>Fusió</i>	
$^2\text{H} + ^2\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + n + 3,2 \text{ MeV}$	
$^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n + 17 \text{ MeV}$	
<i>Fissió</i>	
$^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{95}\text{Sr} + ^{139}\text{Xe} + 2n + 211 \text{ MeV}$	
$^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{Pu} + e + n$	

3.3.2. OPTOELECTRÒNICA: UNA TECNOLOGIA PER A LA INFORMACIÓ

El desenvolupament del primer transistor, el 1945, i el del primer làser, el 1960, representen dues de les fites tecnològiques més importants del nostre segle. Totes dues estan basades essencialment en la mecànica quàntica. En el primer, hom aprofita la comprensió de les característiques dels materials semiconductors (materials la conductivitat dels quals es troba entre la dels bons conductors, com els metalls, i la dels aïllants, que és nul·la), per tal de construir dispositius amplificadors miniaturitzats, en els quals una petita variació d'un voltatge en un terminal pot produir una gran variació de voltatge en un altre terminal. En molt pocs anys, els transistors semiconductors van reemplaçar completament els antics amplificadors basats en làmpades de buit, cares, vulnerables, que ocupaven molt d'espai i s'escalfaven moltíssim. L'impacte en les tecnologies de comunicacions o en el desenvolupament d'ordinadors fou fulgurant. La nostra societat de la informació i de la informàtica reposa en els materials semiconductors. El gran pas endavant en miniaturització aconseguit amb els primers dispositius semiconductors (cada quinze anys es redueix en un factor 10 les dimensions lineals dels dispositius), fou seguit poc després pel desenvolupament dels primers circuits integrats, que incloïen en làmines diminutes una gran quantitat de dispositius. Des d'aleshores, la cursa per a la miniaturització ha estat una de les línies principals de recerca, amb enormes repercussions econòmiques i socials. La popularització recent d'ordinadors personals hauria estat impossible sense les espectaculars miniaturitzacions dels dispositius esmentats.

Pel que fa al làser, representava una altra victòria de la mecànica quàntica. La desexcitació induïda d'un àtom excitat produïda per la proximitat d'un fotó de la freqüència adient permetia amplificar poderosíssimament senyals lluminosos, de forma coherent. En la llum usual, les ones són emeses de manera independent pels diversos àtoms, de manera que els efectes de cada fotó no se superposen constructivament, ans es contraresten en bona part. En canvi, en el làser, els efectes de tots els fotons se sumen constructivament. Això permet assolir senyals elèctrics d'una gran potència o bé d'una extrema finor. Les conseqüències industrials (tallar làmines de metall amb gran facilitat i sense pèrdues acústiques d'energia, operacions quirúrgiques, desenvolupament de discs compactes) són, també, enormes.

Semiconductors i làsers es combinen en el desenvolupament de l'optoelectrònica, o combinació de dispositius òptics amb dispositius electrònics. És un dels camps en desenvolupament més atractius en la tecnologia de les

comunicacions actuals. En ell vénen a confluïr descobertes relacionades amb els semiconductors i l'electrònica, amb els làsers i els efectes òptics no lineals i amb les fibres òptiques. En la taula adjunta donem la cronologia d'algunes fites rellevants en aquests camps, per tal de poder situar en el temps aquestes descobertes. El desenvolupament de l'optoelectrònica suposa molts estímuls en el camp de la ciència dels materials: làsers de semiconductors, fibres amplificadores amb dopants d'erbi, plàstics conductors i emissors de llum són només alguns dels aspectes recents en aquestes recerques, que descriurem ací molt breument.

Un dels problemes actuals en la tecnologia està relacionat amb el pas de l'electrònica a la microelectrònica. La microelectrònica presenta limitacions relacionades amb la miniaturització. En moltes ocasions, els problemes vénen més de les connexions entre xips que no pas de la miniaturització dels diversos xips. Si els xips poguessin estar connectats amb raigs de llum i no amb fils elèctrics, hi hauria l'avantatge que aquest raigs de llum poguessin portar més informació per unitat de temps, tinguessin una resposta més ràpida que els electrons i no interferissin entre ells, de manera que poguessin creuar-se molts raigs de llum allà on no podien creuar-se dos cables elèctrics.

Pel que fa a l'ús de materials, l'òxid de silici o el silici pur són alguns dels materials bàsics. L'òxid de silici és el component bàsic de les sorres de les platges; el silici forma part, també, dels silicats, que són la base de moltes roques de la naturalesa. En fondre la sorra i deixar-la reposar, s'obté el vidre; en pastar la sorra amb el ciment s'obté morter que afiança les construccions. Aquestes havien estat les aplicacions tecnològiques del silici fins a meitats d'aquest segle. El cas del silici (i del germani i d'alguns altres materials) és el paradigma de nova tecnologia a partir d'una comprensió aprofundida de les propietats de la matèria. El silici és a la base dels semiconductors, els quals són a la base de l'electrònica, de la informàtica, de les cèl·lules fotovoltaiques. Un dels problemes del silici, però, és la seva dificultat per convertir electricitat en llum, motiu pel qual, fins ara, ha calgut recórrer a l'arseniür de gal·li per als desenvolupaments d'optoelectrònica. L'arseniür de gal·li, però, és més car i de manipulació més complexa que la del silici. Per aquest motiu, s'ha intentat investigar com es podria aconseguir efectes electroluminescents en silici. Una via prometedora és estudiar el silici porós. En les parets del porus, o bé propietats superficials o bé canals quàntics microscòpics modifiquen prou les propietats del silici per permetre que pugui convertir electricitat en llum.

TAULA 9. *Cronologia d'algunes fites essencials per a l'optoelectrònica*

<i>Electrònica</i>	
1948	Shockley, Bardeen i Brattain fabriquen els primer transistors
1959	Primers circuits integrats
1979	Primer transistor òptic
1992	Primers plàstics conductors i emissors de llum
<i>Làser</i>	
1954	Townes fabrica el primer màser
1960	Maiman fabrica el primer làser de rubí (polsant). El mateix any, Javan aconsegueix el primer làser d'heli i neó (continu)
1962	Primers làsers de semiconductors (GaAs)
1969	Primers efectes òptics no lineals
<i>Fibres òptiques</i>	
1966	C. Kao formula les primeres teories sobre fibres òptiques
1970	Primeres fibres òptiques amb pèrdues inferiors a l'1 % per quilòmetre
1978	Primer sistema de comunicacions per fibra òptica
1987	Fibres amplificadores amb dopatge d'erbi

Una de les fronteres actuals en l'exploració dels plàstics rau a aconseguir plàstics conductors. El 1975 s'obtingué per primera vegada un plàstic semiconductor, tot i que la seva conductivitat elèctrica era uns quants milions de vegades inferior a la del coure. La idea de convertir plàstics (generalment aïllants) en conductors és aconseguir cadenes conjugades, en les quals s'alternen enllaços simples i dobles. Aquests enllaços dobles poden anar corrent al llarg de la cadena i condueixen, així, electricitat. La conductivitat pot augmentar molt considerablement, segons que es va descobrir el 1975, si, amb dissolvents adients, podem extreure un 10 % dels electrons de la cadena, ja que això augmenta la mobilitat dels electrons restants. Una altra frontera relacionada amb l'anterior rau a aconseguir plàstics productors de llum, com els díodes emissors de llum fets amb materials inorgànics. El 1990 s'aconseguia el primer plàstic emissor de llum i des de llavors s'ha ampliat el domini de freqüències lluminoses que es poden aconseguir. Un dels problemes és la poca durada d'aquests materials, que per ara els incapacita per a aplicacions industrials.

Pel que fa a les fibres òptiques, un dels progressos recents més importants ha estat la consecució de fibres amb efectes amplificadors del senyal. Fins ara, el senyal s'havia d'amplificar amb components electrònics intercalats en la fibra a intervals prudencials. El problema d'aquests amplificadors era la seva lentitud (són unes cent vegades més lents que la capacitat de transmissió d'informació de les fibres òptiques) i, per aquest motiu, suposaven un coll d'ampolla en la transmissió. El dopatge de fibres òptiques amb erbi ha permès que l'amplificació es pugui dur a terme en la mateixa fibra i per mètodes purament òptics, sense haver de convertir el senyal òptic en senyal elèctric i viceversa. El mecanisme consisteix a excitar els àtoms d'erbi, els quals actuen, en arribar el senyal òptic, com a bombejador de làser, de manera que es desexciten coherentment amb el senyal d'entrada i l'amplien considerablement.

3.3.3. LA DEGRADACIÓ DE LA MATÈRIA: CONTAMINACIÓ AMBIENTAL

Molts materials tenen només una durada efímera i canvien molt en ser usats. Alguns d'aquests materials residuals són capaços de degradar-se fins que donen de nou constituents simples que retornen al paisatge o a l'ambient. La matèria tanca, així, un cicle i queda oberta a la potencialitat d'un nou cicle. D'altres detritus, en canvi, són permanents o es degraden amb molta dificultat. Són materials desproveïts de potencialitats d'ús i que perjudiquen, bé sigui per ocupació d'espai bé sigui per toxicitat, els materials vivents. En la nostra societat industrial i de consum, els problemes suscitats per les deixalles són grans i ha esdevingut una preocupació saber com reaprofitar o com contribuir a degradar aquestes deixalles. Es tracta, per exemple, de runes, de plàstics, de detritus radioactius, o de gasos que perjudiquen la capa d'ozó. En tots aquests casos, la permanència i creixent abundància de la matèria és un problema, tal com ho és la creixent escassetat de combustible.

Actualment, aconseguir fusió nuclear controlada és, com hem dit, un dels reptes més ambiciosos de la tecnologia. La importància de la fusió no rau només en el gran rendiment i en la gran quantitat d'energia disponible, sinó també en el fet que no allibera CO_2 a l'aire. En efecte, aquest gas augmenta l'absorció de radiacions infraroges en l'atmosfera i n'incrementa la temperatura, cosa que podria dur a canvis climàtics que augmentarien la desertització. Per exemple, fa 200 anys el nombre de tones de carboni presents a l'atmosfera era de l'ordre de 0,59 bilions, mentre que en actualment és de 0,76 bilions, augment que ha fet pujar en un 1 % l'absorció atmosfèrica d'energia. Es pretén

arribar a estabilitzar el contingut de CO_2 a l'atmosfera en 1,2 bilions de tones, valor que implicaria un augment de la temperatura mitjana del planeta entre $1,5^\circ\text{C}$ i $4,5^\circ\text{C}$. Si no es prenen mesures per estabilitzar-ho, podria superar els 1,6 bilions de tones el 2200, amb un augment de temperatura entre 5°C i 6°C . La política per aconseguir no sobrepassar els 1,2 bilions consistiria a reduir en un 25 % les emissions de CO_2 en països industrialitzats i a duplicar les emissions de CO_2 dels països del tercer món, encara no industrialitzats però amb una gran demanda energètica.

Un dels problemes oberts per a una estimació dels efectes d'escalfament a mig termini és l'efecte dels núvols. Aquests, per una banda, contribueixen a l'escalfament, ja que absorbeixen la radiació d'infraroig emesa per la Terra; per aquest motiu, les nits ennuvolades no són tan fredes com les nits clares. D'altra banda, contribueixen al refredament de la Terra, ja que reflecteixen la radiació d'ona curta que arriba del Sol, i per aquest motiu els dies ennuvolats són més freds que els dies assolellats. Un escalfament del planeta duria a més evaporació d'aigua i, per tant, a un increment en la nuvolositat. Per aquest motiu, saber quin dels dos efectes predominarà resulta crucial per tal de fer prediccions acurades de l'evolució de la temperatura. Tanmateix, la resposta no és senzilla, ja que depèn de l'altura dels núvols, de la grandària de les gotes i del terreny sobre el qual els núvols es produeixen.

Els tres principals problemes actuals referents a l'acció dels núvols sobre el clima es refereixen al gruix dels núvols tropicals, a la distribució de grandària de gotes i a les propietats d'absorció. Respecte al gruix dels núvols, cal saber que els núvols més prims contribueixen més a l'absorció que a la reflexió, mentre que en els gruixuts predomina la reflexió sobre l'absorció. Un increment en la velocitat d'evaporació a les zones tropicals faria que els núvols en aquesta zona fossin més gruixuts i, per tant, contribuïssin a refredar l'ambient; d'aquesta manera es contribuiria a una homeostasi o control tèrmic de les zones tropicals. Un segon factor es refereix a la distribució de grandària de les gotes en els núvols. Per veure la subtilesa d'aquests efectes, esmentarem una observació de Lovelock referent als possibles efectes biològics en la textura dels núvols. Un increment de temperatura duria a un increment en la població marina de plàncton. Aquesta població emet unes substàncies, dimetilsulfurs, que actuen com a nuclis de condensació de les gotes. Per aquest motiu, en els núvols que es formessin, les gotes serien més petites, ja que hi hauria més nuclis de condensació. Això faria que augmentés la reflectivitat dels núvols (ja que la reflectivitat depèn de l'àrea total de les gotes, que és més gran en núvols de moltes gotes petites que no pas en els de poques gotes grosses) i, en conseqüència, s'incrementaria el paper refrescant dels núvols. D'aquesta manera, biologia i meteorologia

contribuirien globalment a una homeostasi del planeta. Finalment, un darrer problema es refereix a observacions recents sobre l'absorció de radiació infraroja per part dels núvols, que semblen indicar que és força més gran del que es creia fins ara.

3.4. CONCLUSIONS

Des del punt de vista conceptual, aquest capítol suscita les següents línies de reflexió sobre canvis de punts de vista respecte als materialismes clàssics:

a) El contingut energètic o l'estructura formal de les agrupacions de la matèria dóna lloc a noves potencialitats i propietats emergents de la matèria.

b) Des del punt de vista econòmic, hi ha una tendència a primar la informació sobre la matèria com a bé econòmic (el cost del silici és ínfim en comparació amb el saber fer que requereix la seva manipulació). Així, la matèria, tot i que segueix jugant un paper important en economia, ja no és l'element primordial del cicle productiu. Informació i estratègies d'organització jugaran un paper bàsic en el futur.

c) Fins fa poc, les matèries primeres eren vistes com un valor i les deixalles no preocupaven. En l'actualitat, preocupen el tractament o reciclatge dels detritus i hi ha perspectives relativament properes d'un exhauriment de combustibles clàssics. Cal parar esment tant a l'origen com al final de les matèries implicades en el procés productiu i optimitzar-ne molt acuradament el rendiment.

d) La matèria tecnològica ens subratlla amb especial intensitat una triple globalitat:

– *En el temps*. Molts dels recursos són limitats i no renovables; per tant, el seu consum afecta el patrimoni de les generacions futures, que se'n veuran desprovistes.

– *En l'espai*. La contaminació atmosfèrica pot dur a efectes globals, com ara un escalfament planetari o una reducció en la capa d'ozó.

– *En el cicle productiu*. El tractament dels residus s'ha d'incorporar a l'avaluació econòmica.

e) L'entorn controlat artificial afecta la nostra relació amb la naturalesa: ens sentim menys dependents de l'entorn natural. D'altra banda, la consciència creixent dels efectes, sovint devastadors, de la nostra activitat sobre el medi natural fa que anem recuperant la sensibilitat envers aquest medi, i introdueix noves formes de percepció de la globalitat de la Terra.

f) L'ús de la matèria planteja problemes de valors: quines fonts energètiques cal privilegiar?, com utilitzar les possibilitats d'informació?, com

repartir entre els diversos països les càrregues respecte als efectes globals sobre el planeta?, com impedir l'ús agressiu de la tecnologia (nuclear, química, biològica...)?

g) Amb l'esfondrament dels règims comunistes, i els canvis culturals subsegüents, la influència cultural i política del materialisme històric com a instrument d'anàlisi de la realitat ha disminuït radicalment.

4. LA MATÈRIA VIVA

Origen de la vida; ment i matèria

4.1. VIDA, MENT, MATÈRIA

Cada època té uns reptes cartogràfics específics, que impliquen una nova visió del món. En la nostra època, en què les cartografies de la Terra i de la Lluna són ja elaborades amb gran precisió, s'obren els reptes de les cartografies del cervell, del gen i de l'Univers. Genètica i neurociències configuren tot un univers interior, d'una complexitat superior a la de l'Univers exterior que hem considerat en el capítol segon. A aquest univers interior i a la seva gènesi, està dedicat aquest darrer capítol.

La pregunta sobre què roman al fons dels canvis ha trobat també assaigs de resposta dintre de la biologia. Què és el jo subsistent al llarg de la vida de l'individu, el que dona la unitat a tots aquests diversos cossos que cadascun de nosaltres hem estat (el cos infantil, adolescent, juvenil, madur, senil), a totes les diverses experiències, èxits, fracassos, amors, desenganys? En la metafísica cristiana, es tractaria de l'ànima. En una consideració més propera a la biologia, l'element més evident de permanència és la memòria, i per això Sant Agustí associà la memòria amb l'ànima. En la biologia moderna, els elements de permanència al llarg de la vida de l'individu són les neurones i l'ADN (hom podria afegir a les formes de memòria les del sistema immunològic, però no entrarem ací en aquesta qüestió). Les primeres són les úniques cèl·lules que no es reproduïxen, excepte en la fase embrionària i la primera etapa de la infantesa; el segon és l'element informatiu que va passant de generació en generació de cèl·lules, i que es va modificant d'individu en individu però mantenint la informació bàsica de l'espècie. La memòria material, la memòria afectiva: gens i cervell. Fer reviure cèl·lules desaparegudes fa milions d'anys a partir de la seva informació genètica, a partir del seu ADN,

quin estímul per a la reflexió! Però no es tracta pas d'una memòria cristal·litzada i estàtica, ans d'una memòria plàstica i evolutiva, creadora: les connexions entre les neurones poden anar variant i, així, emmagatzemen, noves informacions i guanyen noves possibilitats combinatòries; la memòria genètica va experimentant mutacions, que podran donar lloc, si estan prou ajustades al medi exterior, a noves espècies.

La consideració de la matèria viva ha produït debats especialment apassionats. Els dos nuclis més vius de discussió es refereixen a l'origen de la vida i a la relació entre ment i matèria. Pot la matèria donar lloc per si sola a la vida? Pot la matèria donar lloc per si sola al pensament? El culte a la germinació, el culte als morts, són els primers sentiments de sagrat que sorgeixen en la història de la humanitat. Com invocar la vida? Què queda de nosaltres o dels éssers estimats després de la mort? Trobem també ací la pregunta per la permanència rere el canvi i la multiplicitat: la permanència del jo, de la unitat de l'experiència o de l'espècie. Els estudis científics referents a aquests temes tenen, com l'estudi de la cosmologia, una fascinació especial per la seva implicació tan directa en el coneixement de què som. Iniciarem aquest capítol amb un breu repàs de les idees més rellevants respecte a aquestes qüestions.

4.1.1. MATÈRIA I VIDA

Podríem distingir diverses maneres principals d'abordar el problema. Hom pot considerar que hi ha una discontinuïtat entre matèria inerta i matèria viva, i que ambdues matèries són eternes; o bé hom pot considerar que no hi ha discontinuïtat, i que la vida apareix o bé per generació espontània de manera habitual o bé, en ocasions molt excepcionals, quan conflueixen unes circumstàncies molt favorables.

Durant una època, hom considerà l'Univers com un organisme viu, més que no pas com un mecanisme. La presència d'éssers vius concrets era una manifestació d'aquesta vitalitat general que imbuïa tot l'Univers, i no calia preguntar-se pels orígens, ja que hom imaginava que l'Univers era etern. Durant molts segles hom interpretà la matèria viva com quelcom radicalment diferent de la matèria inorgànica i creada al mateix temps que ella. La síntesi de la urea l'any 1828 suposà la primera ruptura de la barrera hipotètica entre matèria orgànica i inorgànica, una mica com la teoria newtoniana trencà la barrera entre la matèria subllunar i la supralunar.

El llibre del Gènesi, en canvi, postula un Univers creat per Déu, i atribueix a una acció divina l'haver salvat la discontinuïtat entre la matèria inerta i la

matèria viva. De fet, el llibre del Gènesi fa intervenir Déu no tan sols en la creació del món sinó també en la formació del Sol i les estrelles, en la separació de mar i terra i l'aparició dels vegetals, en la creació dels peixos i animals marins, en la creació posterior dels mamífers i animals terrestres, i en la creació de l'home. Actualment, no hi ha un rebuig especial a imaginar que processos físics han conduït, un cop creat un cert Univers primordial, a la formació de les galàxies o a l'estructuració de la Terra, però hi ha, en canvi, un cert rebuig a admetre que la física i la química hagin pogut dur a la formació de la vida i a l'aparició de l'home. Així, Déu seria necessari el primer dia (creació de la matèria), no ho seria el segon ni el tercer, ho tornaria a ser en el quart (aparició de la vida), però potser no en el cinquè, i tornaria a ser necessari en el sisè (aparició de l'home). Podria ser que l'aparició espontània de la vida no suposés, de fet, un problema teològic de gaire envergadura.

Per a Aristòtil, com per a d'altres filòsofs de l'antiguitat, no hi hagué problema a considerar la generació espontània de la vida a partir de la matèria: l'aparició de cucs i larves a la terra ho indicava prou clarament. Tot i això, s'acceptava la idea d'un principi vital exclusiu dels éssers vius, que explicaria el metabolisme i la reproducció i que donaria un caràcter especial a la matèria viva. L'any 1861 Pasteur demostrava la inexistència de generació espontània a partir de matèria inorgànica. Aquesta conclusió científica fou llegida de dues maneres oposades: o bé això demostra que Déu ha hagut de crear la vida, o que la vida ha existit eternament. En el darrer cas, i donades les evidències que la Terra no ha existit sempre, Arrhenius proposà la teoria de la panspèrmia, segons la qual hi ha vida en molts llocs de l'Univers i la Terra fou colonitzada per alguna forma molt senzilla de vida que evolucionà vers vides més complexes. La idea d'Arrhenius, rebutjada per Becquerel, el qual subratllà els efectes destructors de la radiació ionitzant present en l'espai, ha estat represa recentment per Hoyle i altres autors, a partir de l'observació d'un gran nombre de molècules orgàniques complicades sobre la superfície de diversos asteroides i meteorits. Haeckel, per altra banda, desenvolupà una visió monista de la realitat basada en les possibilitats creatives de la matèria, de la qual les idees de substància, evolució i causalitat serien els pilars bàsics. La llei de substància combina la conservació de matèria i la conservació d'energia, i suggereix que les substàncies tenen el doble atribut de matèria i força, la qual cosa confereix un poder especial a la matèria, tot rebutjant tant l'espiritualisme com la lògica materialista.

La visió actual és que, en circumstàncies relativament excepcionals, pot arribar-se a salvar la discontinuïtat entre matèria inerta i matèria viva, mitjançant la formació espontània de les molècules essencials de la matèria viva i la seva posterior agrupació, d'una manera que encara cal escatir, per tal de donar les primeres cèl·lules.

4.1.2. MENT I MATÈRIA

Les principals idees respecte a la relació entre ment i matèria podrien sintetitzar-se en tres grans línies: un dualisme ment/matèria, un monisme materialista, i un monisme idealista. A més, hom podria afegir-hi altres punts de vista, com el conductisme, o el doble aspecte mental i material d'una realitat panteïsta, o teories com el materialisme dialèctic que, tot i declarar-se materialistes, no aclareixen mai què és per a elles la matèria.

4.1.2.1. *Dualisme*

El dualisme és un punt de vista amb arrels molt antigues. La civilització egípcia considerà la permanència d'una ànima que passaria, després de la mort, a un tipus de vida molt semblant a la vida terrenal. En l'àmbit grec, hom imaginà inicialment que les ànimes eren com ombres, punt que es troba il·lustrat a la visita d'Ulisses a l'hades a l'*Odissea*. Les teories òrfiques desenvoluparen i aprofundiren la idea que l'home està compost per un element terrenal i un element diví, units provisionalment i per força, i postularen la necessitat d'un alliberament de l'element diví. Plató, en el *Fedó*, donà categoria ontològica i filosòfica a la idea d'ànima, que pertanyeria al món de les idees i que, tot i encadenada al cos, permetria el coneixement intel·lectual a partir de la memòria de les idees. Aristòtil, que sempre veié amb suspicàcia el món de les idees, interpretà l'ànima com a forma del cos, ànima vegetativa, sensitiva i intel·lectiva, les dues primeres mortals i la tercera, pròpia de l'home, parcialment immortal.

En el cristianisme inicial, no es parla d'ànima, sinó de resurrecció del cos. De mica en mica, s'hi anà introduint el dualisme platònic i, sota la influència decisiva de sant Agustí, la dualitat ànima/cos s'establí amb més vigor. Sant Tomàs d'Aquino mitigà aquesta dualitat i insistí en la unitat essencial de l'ésser humà: l'ànima espiritual i incorruptible s'uniria essencialment a la matèria i la configuraria com a ésser humà. Tot i això, el caràcter immortal de l'ànima, en contraposició al caràcter mortal del cos, ha fet que en el cristianisme es visqui una mentalitat dualista. És interessant remarcar, en aquest sentit, que l'existència d'una ànima no suposa l'existència de Déu ni la immortalitat de l'ànima: algunes teories han defensat la idea d'ànimes mortals o d'ànimes immortals i sense Déu; il·lustració del darrer cas seria, per exemple, la de Plató.

Un problema crucial en el dualisme és saber com interaccionen ànima i cos. Per a alguns filòsofs, hi ha interacció: Descartes arribà a atribuir una

localització precisa de l'ànima a la glàndula pineal del cervell; Eccles, prestigiós neurofisiòleg del segle xx, ideà un mecanisme d'interacció entre ànima (creada) i cos (cervell format per evolució) a través d'una acció subtil de l'ànima sobre el despreniment a les sinapsis del còrtex superior del cervell de les vesícules que contenen els neurotransmissors.

Altres filòsofs han negat la interacció entre ànima i cos. Per a Leibniz hi hauria harmonia preestablerta; ment i cos evolucionen pel seu compte, però en una perfecta harmonia preestablerta per Déu, que només actua per iniciar ambdós processos. Per a Malebranche ment i cos són independents i no interaccionen directament; però ambdós es troben en Déu, i és Déu qui va establint entre ells connexions a cada instant

4.1.2.2. *Materialisme*

La idea que la matèria és l'únic constituent de l'Univers i que la ment no és sinó un producte de la matèria és molt antiga. Lucreci utilitza l'atomisme de Demòcrit per negar l'existència de l'ànima, tot insistint en l'exclusiva realitat dels agregats d'àtoms. Cal dir, però, que el materialisme no implica que no existeixi ànima: podria ser que l'ànima fos material, composta d'una matèria subtil com la que hom pensà que podria ser el calòric. Aquest fou, per exemple, el punt de vista defensat per Hume o, fins i tot, per Demòcrit, en suposar que hi podria haver déus compostos d'àtoms subtilíssims lligats en formes perdurables.

Els models proposats pels mecanicistes per explicar la ment han variat segons les èpoques. En el segle xvii, l'èxit del model mecànic de l'Univers i la fascinació pels autòmats portà a sospitar que els éssers vivents podrien ser, també, un tipus de màquines molt perfeccionades i complexes, però essencialment mecàniques. Aquest fou el punt de vista de Descartes respecte als animals, exposat al *Discours de la Méthode* (1637). A diferència de l'home, que té esperit pur i pensament pur, tots els processos vitals i tots els comportaments dels animals s'expliquen per la disposició i els moviments de les seves parts, com autòmats. La Mettrie estengué les idees mecanicistes de Descartes al cervell humà i parlà de *L'Homme Machine* (1748), i Holbach, poc després, presentà la idea d'un Univers completament mecànic a *Le système du monde* (1770), precursor del determinisme de Laplace.

Després del materialisme mecanicista del segle xvii es desenvolupà, cap a finals del segle xviii, un materialisme fisiologista. És famosa la frase de Cabanis (1802), repetida molt sovint en el segle xix pels materialistes biològics, segons la qual «el cervell segrega els pensaments com el fetge segrega la bilis».

Moleschott, Vogt, Büchner seran, més i tot que Feuerbach, exponents d'aquest punt de vista. Moleschott repetirà, lleugerament canviada, la frase de Cabanis, i posarà el metabolisme com a il·lustració de transformació de substància sense pensament en substància amb pensament. Posteriorment, aquesta idea d'un determinisme biològic, que concedeix molt de pes a la matèria en la vida, especialment en l'àmbit neurocerebral, durà a concepcions culturals molt oposades: per exemple, el penalista italià Lombroso considerarà el criminal com un malalt i tractarà de millorar les condicions penitenciàries, mentre que, per altra banda, el francès Gobineau utilitzarà aquest materialisme biològic com a base d'una justificació del racisme.

Posteriorment, el materialisme del nostre segle serà de caire neurobiologista. Changeux, a *L'home neuronal*, o Crick, a *La recerca científica de l'ànima*, en són dos exemples ben actuals. El caràcter purament neuronal dels objectes mentals, per a Changeux, o la recerca de la consciència en els estudis de la visió, per part de Crick, són les idees centrals dels seus estudis, a més d'unes bones introduccions a les idees bàsiques sobre neurones, sinapsis i funcionament del cervell. Una altra mena força recent de materialisme té com a referència la intel·ligència artificial. Es tracta, més que de materialisme estricte, d'un funcionalisme, que veu els estats cerebrals com una funció, més que no pas com un estat d'una matèria concreta. En certa manera, la idea que hom pugui aconseguir una intel·ligència amb materials molt diferents que els del cervell, a partir tan sols de connexions prou riques i elaborades, seria una idea que, més que materialista, posaria en relleu el caràcter d'estructura independent de la matèria concreta del pensament. El punt de vista de la intel·ligència artificial ha rebut diversos atacs, un dels més originals dels quals és el de R. Penrose, que a *La nova ment de l'emperador* postula que la característica pròpia de la consciència és la formulació no algorísmica de judicis, funció que seria irrealitzable per una màquina que funcionés segons unes instruccions mecàniques concretes.

4.1.2.3. Idealisme

L'idealisme postula que el pensament és la sola realitat, de manera que la matèria no existiria sense ser observada per un ésser pensant. Plotí al segle III d. C. defensà que l'Univers era una immensa consciència còsmica de la qual participen, com a punts de vista concrets, les ànimes individuals. Berkeley resumí aquest punt de vista en la seva cèlebre dita *esse est percipi*, ésser és ser percebut. La mecànica quàntica actual no ha desdenyat, en algunes interpretacions, l'idealisme. Wigner suggerí que podria ser la consciència la que

provoqués el col·lapse de la funció d'ona i donés realitat definida a les potencialitats d'estats compreses en la funció d'ona. Una extrapolació de les idees de Wigner duria a un observador universal que amb la seva observació donaria realitat al món, un punt de vista amb prou semblances amb el de Plotí.

El tema de la ment és molt ric i ha merescut atenció des de punts de vista molt diversos, com el conductisme, el fenomenologisme i les teories de doble aspecte, segons les quals mental i material serien dos aspectes diferents d'una mateixa realitat universal, a l'estil de la del panteisme de Spinoza.

4.2. L'ORIGEN DE LA VIDA

Els éssers vivents es caracteritzen per metabolisme i reproducció. Abans de la descoberta de l'estructura en doble hèlix de l'ADN hom dirigí l'atenció vers l'origen d'un possible metabolisme. Després de 1953, la genètica passà a un primer lloc i hom començà a intentar explicar com es podria aconseguir una molècula capaç de transmetre la informació genètica. Per aquest motiu, evocarem en primer lloc la molècula de l'ADN, que ocupa un lloc protagonista en la biologia molecular, i posteriorment ens referirem a algunes qüestions actuals sobre l'origen de la vida.

4.2.1. EL MATERIAL GENÈTIC

Els constituents essencials dels éssers vius són les proteïnes i els àcids nucleics. Les primeres són responsables de l'estructura i el funcionament del cos i els segons de la transmissió d'informació entre generacions. A aquests materials caldria afegir els lípids, essencials per a les membranes cel·lulars, i els glúcids, que acostumen a actuar com a combustible del metabolisme.

La informació genètica es troba en l'ADN (àcid desoxiribonucleic, usualment designat, en la literatura científica, per les sigles DNA), llarg polímer format per una successió de nucleòtids, compostos per tres sucres (desoxiribosa), un fosfat i una base. Les bases poden ser de quatre tipus: adenina (A), timina (T), guanina (G) i citosina (C). La descoberta de l'estructura en doble hèlix de l'ADN el 1953 inicià una revolució extraordinària en biologia molecular. Poques vegades es té la sort de trobar una estructura tan directament vinculada amb la seva funció. Efectivament, hom observà que les bases A d'una cadena sempre estan en correspondència amb una base T de l'altra cadena, i que a cada base G en una cadena li correspon una base C en la

cadena complementària (i viceversa). Aquesta complementaritat dels parells AT i GC suggeria immediatament un mecanisme de duplicació. Quan les hèlixs se separen, arribat el moment de la reproducció cel·lular, pot anar-se refent la cadena complementària gràcies a la complementaritat dels parells de bases, de manera que s'obtenen com a resultat dues noves dobles hèlixs que contenen la mateixa informació que la doble hèlix inicial. D'aquesta manera, les cèl·lules filles reben la mateixa informació que la cèl·lula mare. Per a aquesta duplicació és necessària l'actuació de certs catalitzadors proteítics, o enzims.

A la taula 11, resumim les principals fites dels estudis de biologia molecular referents a l'ADN.

TAULA 10. *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

TAULA 11. *Cronologia d'algunes fites bàsiques en biologia molecular*

1953	J. Watson, F. Crick i M. Wilkins proposen el model de la doble hèlix per a l'ADN (Premi Nobel 1962)
1957	A. Kornberg descobreix la DNA-polimerasa capaç de sintetitzar ADN a partir dels seus components (Premi Nobel 1959)
1960	Descobriments de l'ARN missatger, que llegeix la informació de l'ADN i la duu a les fàbriques moleculars de proteïnes (ribosomes)
1961	F. Jacob i J. Monod proposen el model de l'operó de com es connecta i desconnecta la lectura dels gens (Premi Nobel 1965)
1966	Es culmina el desxiframent del codi genètic (relació entre seqüències de bases i proteïnes)
1967	Descobriments de la DNA-ligasa
1970	Primer enzim de restricció específic, que talla l'ADN en un punt concret; bases de l'enginyeria genètica
1972	P. Berg aconsegueix les primeres molècules híbrides d'ADN, amb una part introduïda artificialment. Boyer i Cohen fan la primera clonació d'un bacteri. Es funda la primera companyia d'enginyeria genètica, Genentech
1977	Sanger desenvolupa tècniques ràpides de seqüenciació de l'ADN (Premi Nobel 1980)
1977	Es comencen a produir molècules d'interès humà (somatostatina, insulina, hormona de creixement) mitjançant enginyeria genètica
1982	Cech i Altmann descobreixen que l'ARN pot actuar com a enzim (Premi Nobel 1989)
1983	Primers ratolins transgènics, amb un gen modificat
1983	Primers estudis d'alteració de l'ADN en relació amb malalties hereditàries (malaltia de Huntington)
1985	Primera utilització de l'ADN per a la identificació de persones
1987	Primeres aplicacions d'enginyeria genètica vegetal a gran escala (bacteris que protegeixen del fred les maduixes)
1988	Primer animal transgènic patentat (porta un gen responsable d'un càncer humà)
1988	Inici del projecte genoma
1994	Mecanismes de correcció d'errors en la duplicació de l'ADN

La informació continguda en l'ADN es refereix a les proteïnes, que juguen un paper clau en l'estructura i en el funcionament dels éssers vius. Les proteïnes estan compostes d'una successió d'aminoàcids. Els aminoàcids que intervenen en la matèria orgànica són vint. Entre 1953 i 1960 s'arribà a desxifrar el codi genètic: cada tres parells de bases successius (codons) especifiquen

un aminoàcid, de manera que diversos fragments de l'ADN (diferents gens) contenen informació sobre diverses proteïnes. Aquesta és, en efecte, la possibilitat més econòmica: amb dos parells de bases, hom podria codificar tan sols setze aminoàcids diferents. Amb tres parells de bases, hom podria codificar fins a seixanta-quatre possibilitats diferents. Per tant, el codi genètic no és estrictament biunívoc, ans presenta diverses repeticions (un mateix aminoàcid pot correspondre a diversos triplets de parells de bases) i alguns triplets estan reservats a marcar el començament i el final de cada missatge genètic, com ho indica la taula 10. Aquest codi és el mateix per a totes les espècies vives. Descobrim, així, un dels llenguatges més universals de la naturalesa i una de les màquines lectores més universals: el llenguatge de quatre lletres de l'ADN i de vint lletres dels aminoàcids de les proteïnes.

Els fragments de l'ADN corresponents a cada proteïna passen la seva informació (un cop activats els mecanismes de control corresponents) a l'ARN missatger, que porta la seva informació fins als ribosomes, petites màquines moleculars. Aquest RNA (sigla internacional de l'ARN) és semblant a l'ADN, però el sucre que el forma és la ribosa en lloc de la desoxiribosa. En els ribosomes, es van muntant les proteïnes: per cada tres bases de l'ARN missatger (el qual va circulant al llarg del ribosoma de manera semblant a com una cinta de vídeo circula pels terminals lectors de l'aparell corresponent), el ribosoma pren un aminoàcid (que li és subministrat per part d'un ARN de transferència, el qual el pren del medi intracel·lular) i el connecta als aminoàcids precedents, fins arribar a formar, així, una molècula de proteïna. Aquesta proteïna, posteriorment, s'ha de plegar d'una manera especial i característica, per tal de tenir les seves virtualitats estructurals o funcionals pròpies. El plegament de les proteïnes és un dels problemes que reben una atenció molt considerable en la biologia d'avui. Cal insistir en el fet que aquest intercanvi d'informació és irreversible, és a dir, flueix sempre en el mateix sentit, d'ADN a ARN i a proteïnes, però no a la inversa.

La idea segons la qual tot l'ADN correspon a informació sobre proteïnes no és ben bé certa, però. És cert que en els organismes inferiors, gairebé cada fragment de l'ADN porta aquesta informació. En canvi, en estudiar organismes més avançats, com ara els mamífers, s'arriba a la conclusió sorprenent que, de tot l'ADN, tan sols un cinc per cent, aproximadament, intervé en la codificació de proteïnes. Quin significat deu tenir el noranta-cinc per cent restant d'aquesta llarga molècula? Es tracta de residus de proves fallides? Juguen algun paper passiu, de protecció? Un dels treballs actuals consisteix a comparar les correlacions entre parells de bases en les zones codificadores i no codificadores, per tal de poder distingir amb més o menys

rapidesa si una zona és codificadora o no, selecció necessària per poder dur a terme en un període raonablement curt una anàlisi aprofundida de la informació genètica del nostre ADN.

Una altra sorpresa recent ha estat que l'ADN no és una estructura bàsicament estàtica, sinó enormement dinàmica. En les successives duplicacions, el nombre d'errors comesos és força més alt del que se sospitava. No es tracta tan sols d'algun error o d'alguna mutació ocasional, sinó d'un nombre considerable de canvis, els quals són corregits per un sistema d'enzims de reparació que van resseguint la molècula i esmenant els errors detectats. Naturalment, la fallada o la manca d'aquest sistema d'enzims condueix a un càncer amb relativa facilitat.

4.2.2. LES MODIFICACIONS DE LA INFORMACIÓ GENÈTICA

4.2.2.1. *L'evolució*

La informació genètica pot ser modificada per l'atzar, mitjançant mutacions que donaran lloc a individus amb noves característiques, millor o pitjor adaptades al medi. Aquest mecanisme dona lloc a l'evolució i a la diversitat de les espècies. Una espècie està caracteritzada per un cert conjunt d'informacions genètiques, que corresponen, en part, a una sèrie de característiques manifestes fenotípicament. Si l'estudi de l'evolució es dugué a terme fins fa uns trenta anys tot resseguint les propietats manifestes (o fenotípiques), l'estudi de l'ADN permet actualment seguir l'arbre genealògic de les espècies tot comparant l'evolució molecular de la seva informació genètica (o genotip). Seguir l'evolució de la descripció genètica d'una determinada proteïna en diverses espècies permet, a més, establir una cronologia en aquesta evolució i uns parentius que no resultaven evidents a escala fenotípica.

La descoberta del material genètic, la lectura del seu codi, el seguiment de les transformacions biològiques al llarg de la història han dut a una visió en què l'ésser primordial seria el material genètic, mentre que els individus successius serien simples portadors o màquines al servei de la perduració i la transmissió del material genètic. Aquest punt de vista ja fou apuntat per Bergson en *L'évolution créatrice* (1907), molt abans que fos conegut el material genètic concret (els estudis genètics començaren amb els treballs de Mendel de 1866, però fins a finals dels cinquanta hom no arribà a localitzar en quin material concret podia trobar-se la informació genètica). Fa poc, ha estat reprès amb força per R. Dawkins, el qual defensa la hipòtesi que «som màquines

de supervivència, vehicles automàtics programats a cegues per preservar les molècules egoistes conegudes com a gens». Curiosament, ja a la primera pàgina del seu tractat, Dawkins apunta que «si volem construir una societat en què els individus cooperin generosament i amb altruisme, poca ajuda podem esperar de la naturalesa biològica», cosa que sembla implicar un reconeixement que la naturalesa biològica no és l'única ni és completament determinista.

4.2.2.2. *L'enginyeria genètica*

Aprendre el llenguatge del codi genètic ha dut, a la llarga, a la seva utilització. L'enginyeria genètica ha aconseguit modificar el material genètic per tal de fer que l'organisme vivent produeixi altres proteïnes que les pròpies, proteïnes que podrien tenir una utilitat especial per als humans. Les fites principals d'aquesta història apassionant, que lliga biologia, medicina i economia, són exposades de forma succinta a la taula 11. S'ha arribat, així, a una interferència en el que abans era domini exclusiu (automàtic o a l'atzar) de la vida. Com passà amb la primera síntesi de materials orgànics a partir de la matèria inerta, que indicà per primera vegada la continuïtat entre matèria inerta i matèria viva, aquesta possibilitat ha trencat una nova barrera entre la matèria viva i la resta de materials.

La utilitat de l'enginyeria genètica pot ser compresa fàcilment. En efecte, la manca d'alguna proteïna, o un defecte en la seva composició, acostuma a anar acompanyada d'alguna malaltia. Per això, una de les línies de més vigor en les ciències biomèdiques d'avui consisteix a buscar la base genètica d'algunes malalties. El mecanisme seria el següent: s'introdueix en un bacteri un ADN modificat artificialment al qual s'ha afegit informació sobre una determinada proteïna que hom voldria obtenir, com ara, per exemple, la insulina, necessària per al tractament de la diabetis. Aquest bacteri, a més de produir les seves proteïnes característiques, produeix també la nova proteïna sol·licitada. Ara bé, els bacteris es reproduïxen rapidíssimament, de manera que un bacteri inicial dóna lloc a vuit bacteris fills en una hora, cadascun dels quals donarà lloc a vuit bacteris més al cap de l'hora següent, i així successivament, en ràpida progressió geomètrica, que duu a uns disset milions de bacteris al cap de vint-i-quatre hores. La informació introduïda en el primer bacteri va éssent transmesa als altres bacteris, de manera que al cap de poc temps es disposa d'una massa abundantíssima de productors de proteïna. La revolució de l'enginyeria genètica fa pensar en la revolució que suposaren els inicis de la ramaderia al començament del neolític.

D'altra banda, l'associació de malalties amb anomalies genètiques ha dut un cert sentit determinista de l'individu, determinisme o fatalisme que, de totes maneres, la capacitat recent d'actuació sembla trencar, tot obrint noves perspectives. Així, hom podria pensar ja no tan sols en la fabricació de medicines mitjançant enginyeria genètica, sinó fins i tot en modificar (en l'òvul o l'espermatozou) els gens que donen lloc a malformacions o malalties congènites.

Un altre camp d'interès pràctic el constitueixen, per exemple, les modificacions genètiques en plantes. Aconseguir plantes comestibles capaces de resistir graus elevats de sequera, o espècies de blat de gran productivitat, o tomàquets que puguin resistir bastant de temps sense florir-se són ja en bona part realitats desenvolupades a escala comercial.

4.2.3. L'ORIGEN DE LA VIDA

La vida ha fascinat sempre l'observador de la matèria. Actualment, la recerca de la comprensió de l'origen de la vida es concentra en l'estudi d'una molècula autoreproductora, capaç de transmetre informació, com ara l'ADN. Tot i això, tot apunta que no fou l'ADN, sinó altres molècules més simples, com potser l'ARN, les primeres molècules autoreproductores i transmissores d'informació. A continuació, sintetitzem les exploracions sobre l'origen de la vida en una breu taula cronològica.

TAULA 12. *Algunes fites en l'estudi de l'origen de la vida*

1828	F. Wohler sintetitza la urea, primera molècula orgànica sintetitzada artificialment
1859	Darwin publica <i>L'origen de les espècies</i> i proposa la teoria de l'evolució
1861	Pasteur demostra que no hi ha generació espontània de la vida a partir de la matèria inanimada
1890	Arrhenius proposa la teoria de la panspèrmia (presència universal de la vida i colonització del planeta per vida exterior)
1922	Oparin: conferència sobre la síntesi abiòtica dels compostos necessaris per a la matèria viva
1929	Haldane: la vida ha nascut en condicions anaeròbiques
1947	Bernal: estudis sobre síntesi de polímers en condicions prebiòtiques
1953	Miller: primera síntesi artificial d'aminoàcids

- 1960 Oró: primera síntesi artificial de l'adenina
 - 1966 Cairns-Smith proposa la teoria que l'argila actuà com a catalitzador de les primeres molècules autoreplicants
 - 1982 Es descobreix que l'ARN pot actuar no sols com a transmissor d'informació sinó també com a enzim
-

Els estudis sobre l'origen de la vida i la química prebiòtica prengueren un impuls molt gran des que, el 1953, Stanley Miller aconseguí sintetitzar, a partir d'un brou de composició similar a la de la hipotètica atmosfera primitiva (metà, amoníac, hidrogen i vapor d'aigua) sotmès a descàrregues elèctriques d'uns quants milers de volts que simulen els llamps, molècules corresponents a més d'una desena d'aminoàcids diferents, elements essencials en la matèria viva. La composició d'atmosfera utilitzada per Miller, completament reductora, és avui discutida, i se n'afavoreix una altra d'àcid carbònic, nitrogen i vapor d'aigua. Cap el 1960, Joan Oró aconseguia sintetitzar per procediments semblants l'adenina, una de les bases dels àcids nucleics, que també juguen un paper decisiu en la transmissió de la informació. De tota manera, és molt difícil aconseguir sucres d'interès biològic com la ribosa dels àcids nucleics, i les bases pirimidíniques (timina, citosina) són molt més difícils d'obtenir que les púriques (adenina, guanina). També s'han aconseguit alguns dels fosfolípids que formen la membrana cel·lular i que juguen un paper important en la vida. Algunes d'aquestes molècules s'han trobat en meteorits, els quals podrien haver dipositat quantitats importants d'aquestes molècules en les aigües de la Terra primitiva. Cal esmentar que un dels llocs que actualment es creuen més propicis per a l'origen de la vida podrien ser les sorgències hidrotermals del fons del mar. Un altre lloc podrien ser les argiles de la terra.

Totes aquestes molècules, però, encara no són suficients com per suposar que s'ha aconseguit l'origen de la vida. Es consideraria com a primera manifestació, molt elemental, de vida, una molècula capaç d'autoreproduir-se, però per ara, després de quaranta anys d'esforços, encara no s'hi ha arribat. Es tractaria d'ARN o de proteïnes? Sense la informació de la primera, no es podrien produir les proteïnes, però sense les proteïnes, que actuen com a enzims, no es podria duplicar l'ARN. Estem davant d'una versió sofisticada del problema de l'ou i la gallina. Des de 1968, es treballa activament, però amb grans dificultats, en la duplicació de l'ARN sense l'ajut d'enzims. Sembla que la ribosa és massa complexa i que caldria substituir-la per un compost lineal com ara el glicerol. El desafiament d'avui consisteix a desenvolupar sistemes informatius simplificats a partir de precursors prebiòtics.

TAULA 13. *Algunes fites en l'origen de la vida*

Fa 4.000	milions d'anys: primers polisacàrids i oligonucleòtids
Fa 3.600	milions d'anys: primers anaerobis
Fa 3.000	milions d'anys: primers organismes anaerobis fotosintètics; canvi d'atmosfera, que s'enriqueix d'oxigen
Fa 1.600	milions d'anys: primeres cèl·lules amb nucli (eucariotes)

L'aparició de la vida, és excepcional? requereix una intervenció miraculosa? És, al contrari, quelcom d'ineluctable un cop donades les bones condicions químiques i físiques en un planeta? En aquest darrer cas, en quants planetes hi ha vida? Implica la vida arribar a la intel·ligència?

4.3. NEUROBIOLOGIA: MENT I MATÈRIA

La neurobiologia, juntament amb l'enginyeria genètica, és un dels camps de la ciència que amb més empenya estan progressant actualment. La tasca, molt ambiciosa, demana combinar la neuroquímica, la neurofisiologia i la neuroanatomia en una ciència global que intenta explicar fenòmens de les ciències humanes com ara la psicologia, la lingüística o la sociologia.

La dualitat ment/matèria, o ment/cervell, és una altra de les dualitats històriques, sota la perspectiva de les quals se'ns presenta una consideració general de la matèria. Podria pensar-se que la consciència, per la seva complexitat i subtilesa, seria el darrer reducte a sotmetre's al materialisme. Hi ha, en nosaltres, res que transcendeixi la matèria?

Recordem, en primer lloc, l'element bàsic del sistema nerviós: la neurona. Aquestes cèl·lules, de forma generalment arborescent, es distingeixen per una resposta especial als estímuls, que impliquen modificacions de l'ordre de 0,1 volts en el potencial elèctric a través de la membrana cel·lular, modificacions relacionades amb l'intercanvi a través d'aquesta d'ions sodi i potassi, principalment, i que es transmeten al llarg de l'àxon, un llarg cilindre que parteix del cos cel·lular estrellat, amb una velocitat compresa entre una vintena i un centenar de metres per segon. El paper de l'electricitat en l'activitat biològica, i en l'activitat nerviosa en particular, fou posat de manifest per primera vegada per l'italià Galvani a Bolònia el segle XVIII. L'alemany Helmholtz fou el primer a mesurar la velocitat de propagació d'aquests senyals nerviosos al llarg de l'àxon, a finals del segle XIX. Les neurones no estan pas aïllades, sinó

densament connectades entre elles, i formen una xarxa de nervis i un òrgan central, el cervell. Durant un cert temps, hom cregué que la xarxa nerviosa era una mena de sistema semblant a la xarxa de venes i artèries, i que conduiria un fluid elèctric de manera semblant a com la sang circula pels vasos sanguinis. Fou Santiago Ramón y Cajal qui, durant la seva estada a Barcelona, l'any 1888, pogué posar de manifest per primera vegada el caràcter discontinu de les cèl·lules nervioses.

En el cervell, el conjunt d'una gran quantitat d'aquestes cèl·lules (de l'ordre de cent mil milions), profusament interconnectades (aproximadament un bilió de sinapsis, o connexions entre neurones), adquireixen unes propietats emergents insospitades, d'una enorme complexitat, estretament vinculades amb les capacitats superiors de la nostra activitat mental. Aquestes interconnexions no estan unívocament predeterminades, sinó que poden anar-se modificant, apareixent o deapareixent, segons el grau d'actuació dels diversos circuits cerebrals. El problema filosòfic rau a esbrinar quina és la relació entre el cervell i la ment, o el pensament, o la consciència.

Així com la interacció entre tots els objectes de l'Univers queda descrita per una mateixa llei (la de la gravitació), les interaccions entre neurones poden ser molt específiques, segons els diversos neurotransmissors i receptors de cada sinapsi. Això fa que la descripció de l'univers interior sigui extraordinàriament més complexa que la de l'univers exterior. Aquesta complexitat, però, no és incorporada encara a les xarxes neuronals actuals, les quals usen models molt simplificats que, tot i això, han permès d'assolir èxits pràctics extraordinàriament remarcables, com ara xarxes neuronals que aprenen a pronunciar correctament les paraules que llegeixen.

Estudiarem ací algunes recerques recents sobre els neurotransmissors, com a estudi de la matèria; cartografia de l'activitat cerebral, com a estudi de forma, i estudis lògics sobre l'activitat cerebral, com a qüestions enllà de la forma.

4.3.1. NEUROTRANSMISSORS

Els neurotransmissors tenen un paper privilegiat en les relacions entre ment i matèria. Quan un potencial d'acció arriba al final de l'àxon, a la sinapsi en què es comuniquen dues neurones, i després d'un intercanvi d'ions calci, s'alliberen petites vesícules que contenen molècules de certes substàncies químiques que, un cop travessat, per difusió, l'espai sinàptic, actuen sobre els canals iònics de la membrana de la neurona postsinàptica. Segons el tipus de canal que s'obri, el flux d'ions podrà fer més negatiu o més positiu

el voltatge de l'interior de la neurona postsinàptica. En el primer cas (quan s'obren els canals corresponents a ions negatius com ara el clor), l'entrada d'ions negatius dificultarà l'activació de l'esmentada neurona, mentre que en el segon cas (obertura de canals de sodi o de calci, per exemple), l'interior esdevindrà menys negatiu i es facilitarà l'activació. Per això, el primer tipus de sinapsis s'anomenen inhibidores i el segon activadores. Curiosament, la majoria de les sinapsis són o bé inhibidores o bé activadores, i no s'hi acostumen a mesclar neurotransmissors que duguin a tendències oposades.

Hi ha neurotransmissors de molts tipus: aminoàcids, amines, pèptids, esteroides, i fins i tot gasos... Els neurotransmissors més comuns i primers a ser estudiats són el glutamat, en les sinapsis excitadores i el GABA (àcid gamma amino butíric), en les inhibidores. Cal saber, però, que la situació pel que fa als canals no és simple: alguns d'ells són sensibles al voltatge, d'altres al senyal químic i d'altres, finalment, a l'actuació conjunta de voltatge i senyal químic. Així, per exemple, alguns canals (NMDA) només s'obren quan són activats pel glutamat i, alhora, per un voltatge intern inferior al voltatge de repòs, a causa, potser, de l'activitat d'altres sinapsis sobre la mateixa cèl·lula. Així, algunes substàncies, tot i no tenir un paper preferent en la transmissió de senyals, tenen un paper modulador o regulador. Com veurem, mecanismes com aquests podrien ser importants per emmagatzemar memòria.

4.3.1.1. *Malalties i caràcter*

Un dels motors de la recerca en aquest camp consisteix en l'estudi de malalties mentals o d'origen cerebral, moltes de les quals estan associades a neurotransmissors concrets. La síndrome de Parkinson pot ser mitigada gràcies a la descoberta de la L-dopa, que supleix un precursor del neurotransmissor dopamina, absent en la malaltia de Parkinson. En canvi, un alliberament excessiu de dopamina juntament amb una activitat moduladora d'altres neurotransmissors pot dur a la esquizofrènia.

La descoberta de com algunes neurones poden segregar endorfines i encefalines, substàncies anàlogues en alguns aspectes a la morfina i amb propietats analgèsiques sense produir síndromes de dependència, fou una sorpresa de finals dels anys setanta.

Recentment, ha tingut gran èxit als Estats Units un fàrmac anomenat Prozac, que consisteix en fluoxetina, una de les cinc drogues que inhibeixen la reabsorció de la serotonina. L'increment de serotonina en l'espai sinàptic té com a conseqüència una disminució de l'ansietat i actua com a antidepressiu. Per altra banda, hom ha comprovat que la supressió d'un cert receptor de la

serotonina (hi ha catorze tipus de receptors diferents) en ratolins els provoca una gran agressivitat. Anomalies en els receptors de l'hormona tiroïdal provoquen una síndrome d'hiperactivitat i manca de concentració infantil. Veiem com els neurotransmissors poden jugar un paper important en el caràcter.

L'oxitocina és un neurotransmissor associat a funcions reproductores: d'una banda circula pel cabal circulatori i actua com a hormona en el control de les contraccions de l'úter durant el part i la producció de llet en les glàndules mamàries. Per altra banda, a través del seu paper com a neurotransmissor pròpiament dit en les zones de l'àrea medial preòptica i el nucli ventromedial de l'hipotàlem, regula el comportament maternal, sexual i social. Amb ell estan relacionats diversos aspectes dels instints maternals o del plaer sexual. Per exemple, experiments duts a terme amb ratolins o amb ovelles han posat de manifest com les femelles en el cervell de les quals s'injecta oxitocina acullen nadons d'altres femelles, mentre que les femelles usuals rebutgen enèrgicament les cries d'altres femelles. Uns nivells elevats d'oxitocina afavoreixen, a més, un increment de l'activitat sexual, mentre que l'administració d'antagonistes de l'oxitocina produeixen una minva considerable del desig sexual.

Altres neurotransmissors, com la vasopressina, que actua com a hormona sobre els ronyons, on comanda la retenció de l'aigua en la filtració i buidat de substàncies a l'orina, sembla ser un component important en l'establiment de jerarquies de dominància i de submissió en els hàsters, i té un efecte estabilitzador sobre les relacions afectives en els talps.

Amors maternals, desigs sexuals, ansietats, hiperactivitats...: fins a quin punt les característiques que més marquen el nostre caràcter són essencialment, matèria?

4.3.1.2. *Memòria*

Molts estudis recents sobre xarxes neuronals han permès d'avançar en la comprensió de possibles mecanismes per a l'emmagatzemament de memòries a llarg termini. Com ja féu observar Hebb (1954), les memòries podrien residir en les sinapsis, les quals s'anirien modificant en el procés d'aprenentatge. Segons Hebb, una regla d'aprenentatge o potenciació a llarg termini de la memòria podria ser que «quan el senyal d'una neurona presinàptica A troba activada simultàniament la neurona postsinàptica B, la sinapsi en qüestió queda reforçada». Pel que fa als estudis de memòria, es tracta de saber com funciona a la pràctica aquest mecanisme. Podria ser, per exemple, que es

modifiqués la neurona postsinàptica, i s'incrementés el nombre de receptors, o podria ser que es modifiqués la neurona presinàptica, i augmentés el nombre de molècules de neurotransmissor alliberades a la sinapsi. En aquest darrer cas, cal enviar un senyal en sentit invers, des de la neurona postsinàptica, receptora de l'impuls, a la neurona presinàptica, algun senyal que reforci la vinculació entre ambdues cèl·lules. Quina és la naturalesa d'aquest transmissor retrògrad és una qüestió important pel que fa a la memòria.

Hom ha proposat recentment la possibilitat que l'òxid nítric pugui actuar com a neurotransmissor especialment important en aquest sentit. Aquest gas soluble, que té, també, un paper important en la fisiologia de l'erecció, és molt reactiu i dura tan sols un pocs segons, i pot circular amb facilitat, entrant i sortint de les membranes cel·lulars al marge dels canals normals de comunicació. Ara bé, donada la facilitat de difusió considerable de l'òxid nítric, no podria afectar les sinapsis veïnes? Això contradiria la idea fonamental de l'aprenentatge hebbià segons el qual el que s'esdevé en una sinapsi no afecta pas les sinapsis veïnes. El 1989, es posava de manifest que, efectivament, la potenciació d'una neurona de l'hipocamp d'un ratolí també intensificava les sinapsis veïnes. Poc després s'han fet experiments més detallats, en què es bloquejava la síntesi d'òxid nítric en una neurona postsinàptica mitjançant un certa substància química; en aquestes circumstàncies, no es produïa cap potenciació en les sinapsis. Les proves a favor d'un paper important de l'òxid nítric en la neurotransmissió retrògrada es van acumulant. Per a d'altres autors, la difusió de l'òxid nítric contribuiria no tan sols a la formació de la memòria, sinó també a l'organització espacial del cervell en la fase embrionària. Aquests efectes podrien ser deguts a la capacitat de l'òxid nítric per dilatar els vasos sanguinis i al seu paper reforçant de les connexions neuronals. Aquest aprenentatge en volum podria explicar també perquè les neurones s'acumulen en capes i formen estructures columnars en certes regions del cervell. La grandària d'aquestes estructures està relacionada amb la distància efectiva que recorre un senyal d'òxid nítric en el cervell.

4.3.2. CARTOGRAFIA DE L'ACTIVITAT CEREBRAL

La idea que les activitats cerebrals es reparteixen en diferents zones és molt antiga. Ja en el segle III a. C. Posidoni i Nemesi d'Emesa formulaven una teoria de les localitzacions. El segle XIX, la frenologia de Gall, amb els seus aspectes pintorescos referits a la correlació entre aquestes localitzacions i els relleus i protuberàncies del crani, popularitzava la idea de les localitzacions

cerebrals. Les primeres evidències serioses es refereixen a les zones relacionades amb el llenguatge (zona de Broca, relacionada amb la producció del llenguatge, i zona de Wernicke, relacionada amb la comprensió del llenguatge), que varen ser identificades el 1861 i el 1874, respectivament, mitjançant l'observació de pacients que havien perdut la parla (afàsia d'expressió) a causa d'una lesió al peu de la tercera circumvolució del lòbul frontal esquerre, o que havien perdut la capacitat de comprensió (afàsia de recepció) per lesions en la part posterior i superior del mateix lòbul esquerre. La idea de localització havia, però, de fer-se compatible amb la idea holística del cervell, és a dir, amb la d'una entitat global, globalitat innegable en alguns aspectes però que dificultà durant molts anys els estudis sobre localitzacions.

La neurologia clínica proporcionà durant molts anys la base essencial per establir una cartografia cerebral i per diferenciar en el sistema nerviós central alguns grans components o tipus de sistemes (els preferencials i els discriminatius, per exemple). La neurologia clínica permeté, entre d'altres progressos, i per esmentar-ne tan sols alguns exemples, els estudis de lateralització hemisfèrica, de l'oposició frontal-parietal, o la unificació de les activitats de diverses àrees en el cos callós. Així, vam poder aprendre, per exemple, que l'hemisferi esquerre està especialitzat en la manipulació de símbols, com llenguatge i càlcul, i que l'hemisferi dret està més especialitzat en la percepció de l'espai. Caricaturitzant, podríem dir que l'hemisferi esquerre és més abstracte i l'hemisferi dret més concret. També vam aprendre que l'hemisferi esquerre regeix les propietats de la part dreta del cos (l'ull dret, el braç dret) mentre que l'hemisferi dret domina la part esquerra del cos.

Ara bé: les localitzacions de la neurologia clínica eren bàsicament estàtiques, ja que es basaven en els efectes de lesions, accidentals o quirúrgiques, més que no pas en el seguiment directe del funcionament del cervell. També avui, aquests estudis segueixen essent rellevants. Una de les darreres descobertes, que ha suscitat molt d'interès, es refereix als estudis sobre les diferències entre els cervells d'individus homosexuals i individus normals, diferenciació, segons sembla, localitzada en quatre petits botonets o agrupacions de neurones de l'hipotàlem, anomenats nuclis intersticials. Un d'aquests botonets presentava diferències importants en homes i dones; el seu volum era el doble en els primers que en les segones i la seva morfologia era més difusa en les segones que en els primers. Aquests botons presentaven en els homes homosexuals unes característiques molt més apropiades a les del cervell femení que a les del cervell masculí. L'estudi de les diferències entre el cervell femení i el masculí és, actualment, un dels temes de moda en ciència.

Un altre mètode de cartografiar el cervell el constitueix l'electrofisiologia. Es tracta d'estimular diferents àrees del cervell amb petites descàrregues

elèctriques mitjançant elèctrodes diminuts i ben localitzats. Aquest mètode, que permet un grau d'interacció molt superior al de l'estudi de lesions, té l'inconvenient que rares vegades pot ser utilitzat en humans, donat els perills que podria suposar. La cartografia dinàmica del cervell ha fet, desde finals dels anys setanta, un pas de gegant amb noves tècniques proporcionades per una física bastant sofisticada: la TEP (tomografia per emissió de positrons) i, sobretot, la RMN (ressonància magnètica nuclear) funcional, més innòcua i simple que l'anterior. A diferència dels mètodes d'exploració anteriors, els actuals permeten més detall de localització de les àrees del cervell que intervenen en diverses activitats, i permeten, a més, d'estudiar-ne, en temps real, l'actuació. Això ens fa pensar en els telescopis més moderns, amb base a la Terra o a l'espai, que tenen l'atractiu de permetre'ns observar, a més d'una amplitud superior (més galàxies, més buits entre galàxies) i de més detall (sistemes planetaris en estrelles properes), també més acció (formació i explosió d'estrelles i de sistemes planetaris, col·lisions entre galàxies...).

Les tècniques esmentades reflecteixen les variacions d'irrigació sanguínia en les diferents parts del cervell, degudes a l'activitat de les zones cerebrals corresponents. La TEP utilitza aigua radioactiva marcada amb oxígen 15, un isòtop radiactiu que emet positrons (antielectrons). La semivida d'aquest isòtop és de tan sols dos minuts, de manera que, donada la petita quantitat que se n'injecta, els seus efectes sobre l'individu són pràcticament innocus. L'aigua s'injecta en una vena i durant els deu minuts següents es pot procedir a l'exploració, ja que les zones d'on vinguin més positrons seran precisament aquelles on hi hagi hagut un flux sanguini més elevat. Aquests procediments han permès d'explorar el cervell en situacions que van des d'accions físiques molt concretes, com el moviment conscient i voluntari dels dits de les mans, fins a activitats relativament abstractes com l'evocació de paraules de significats o de grafies diversos (verbs, noms, adjectius corresponen a zones lleugerament diferenciades); alhora, han permès veure les diferents zones activades en els cervells de l'home i de la dona en resposta a un mateix estímul.

L'èxit innegable dels estudis de caracterització de les zones del cervell ha estat un estímul considerable per a noves formes de materialisme. En efecte, estem en condicions de seguir de tan a prop alguns dels fenòmens relacionats amb la comprensió del llenguatge, amb el desig amorós, amb la presa de decisions lliures, amb la fruïció d'un fragment musical o d'una imatge, que és lògic que es produeixi un entusiasme en el sentit d'identificar les activitats clàssiques de l'esperit amb els mecanismes de funcionament cerebral. Paradigma d'aquest entusiasme és, per exemple, F. Crick, un dels descobridors de l'estructura en doble hèlix de l'ADN i neurofisiòleg notable, que, a partir dels

èxits en els estudis de les zones cerebrals que actuen en els fenòmens de la consciència visual, camp d'estudi molt desenvolupat des dels treballs pioners de Hubel i Wiesel, ha predicat un materialisme estricte, basat en el postulat implícit que la reducció dels fenòmens del pensament a les activitats de la matèria ja ha estat essencialment aconseguida.

Els estudis sobre localitzacions plantegen el problema de com es produeix la unitat d'acció en el cervell. Ja la neurologia clínic clàssica estudia el paper privilegiat d'algunes zones del cervell, com ara el cos callós, en la integració de les activitats dels dos hemisferis cerebrals. Recentment, i a nivell més detallat pel que fa a la consciència de la percepció, R. Llinàs, sobre la base d'estudis magnetoencefalogràfics, ha proposat que aquest paper integrador podria ser degut a unes ones que cada dotze mil·lèsims de segon recorren tota l'escorça cerebral. Aquesta fragmentació del temps de la consciència en el cervell resulta fascinant des de molts punts de vista.

4.3.3. ESTUDIS LÒGICS

Convé, però, no limitar la consideració del cervell als estudis més directament neurobiològics, i contemplar la seva activitat amb una certa perspectiva i distanciament. En particular, tenen un interès especial aquelles reflexions que constitueixen indagacions sobre la lògica, que és precisament un dels instruments que el raonament intenta utilitzar per tal d'arribar-se a conèixer a si mateix. Esmentaré breument dos tipus de discussions recents en aquest sentit.

La relació de la consciència i el temps, o el caràcter no algorísmic d'algunes decisions, podrien ajudar a la discussió de si la consciència és reductible a les operacions de la matèria o no. Aquest punt juga un paper clau en l'obra de Roger Penrose, *La nova ment de l'emperador*, un llarg recorregut panoràmic per la ciència, en què lògica matemàtica, mecànica quàntica, cosmologia, gravitació quàntica, termodinàmica i neurologia són presentades de forma detallada i atractiva i, alhora, s'intenta demostrar la impossibilitat d'aconseguir una intel·ligència artificial idèntica a la nostra intel·ligència. Penrose utilitza el teorema de Gödel i altres teoremes matemàtics referents a diverses limitacions de les possibilitats de decidibilitat en sistemes axiomàtics finits, per preguntar-se fins a quin punt un ordinador, limitat a operacions algorísmiques, és a dir, determinades per un conjunt finit d'instruccions, no presenta en aquest punt una discontinuïtat crucial amb el cervell, el qual seria, segons aquest autor, capaç d'operacions no algorísmiques, de salts no determinats per instruccions prèvies. Penrose utilitza una possible teoria quàntica de la

gravitació com a garantia de l'existència d'operacions no algorísmiques en la naturalesa.

Podrien les operacions no algorísmiques jugar un paper en la comprensió de la llibertat? Un punt especialment atractiu de les discussions sobre el cervell i la ment es refereix a la naturalesa de la nostra llibertat. Si la ment està determinada per la matèria, i aquesta està regida per lleis deterministes, podria haver-hi llibertat? La mecànica quàntica subratlla, però, que les lleis físiques del món microscòpic no són deterministes, i semblà obrir una escletxa vers la comprensió de la llibertat. Tanmateix, tampoc una teoria que deixi un paper excessiu a l'atzar no pot explicar la llibertat, que no consisteix pas en processos aleatoris. De fet, en els experiments sobre la realitat de la mecànica quàntica, com en molts altres experiments, una hipòtesi tàcita és la llibertat de l'espectador. Si aquest estigués prèviament determinat, els seus experiments serien incapaços de decidir sobre les lleis que regeixen la naturalesa.

D'altres autors, des d'una perspectiva ben diferent, i força més pragmàtica, es pregunten pel tipus de lògica seguida pel cervell, que probablement sigui una lògica borrosa o difusa més que no pas la lògica clàssica. Aquesta lògica, iniciada l'any 1965 per L. Zadeh amb una teoria de subconjunts difusos, generalitza les lògiques booleana, probabilística i multivaluada, i forneix una base matemàtica per a un dels reptes essencials de la intel·ligència artificial, que és l'intentar simular el raonament del sentit comú. Aquest tipus de raonament és efectuat en general a base de coneixements imprecisos, no totalment fiables, i les seves conclusions només poden tenir naturalesa provisional. Així com en el raonament formal de la lògica clàssica en què un cop demostrada una conseqüència aquesta ja no serà desmentida —a no ser que es canviïn, és clar, les hipòtesis en què es basà la demostració—, les demostracions de la lògica difusa no són definitives, ans modifiquen constantment les seves conseqüències i premisses. La consideració de lògica borrosa s'adapta a les contínues vaguetats del llenguatge usual i augmenta la flexibilitat i l'adaptativitat de les màquines, característiques essencials de les activitats intel·ligents, que són difícils de comunicar a una màquina regida per algorismes lògics excessivament estrictes.

4.3.4. XARXES NEURONALS

L'estudi del cervell ha acudit, com és lògic, a diversos models predominants en cada època. L'ordinador ha estat la metàfora bàsica per a la formulació de preguntes sobre el cervell en aquesta segona meitat de segle. Les capacitats impressionants dels ordinadors han fet que hom es preguntí quins són els

límits de la capacitat d'aquestes màquines, i si podran algun dia igualar o reproduir la intel·ligència humana en la seva globalitat. En alguns aspectes, els ordinadors superen àmpliament les nostres capacitats, sobretot a causa de la seva gran velocitat. Cal tenir en compte que l'operació dels ordinadors és deguda essencialment a l'intercanvi d'electrons o al capgirament d'espíns o petits imants microscòpics. Cadascun dels fenòmens elementals dura tot just un centmil·lionèsim de segon, o menys encara, mentre que, en canvi, el procés elemental en el cervell humà (és a dir, la producció d'un potencial d'acció) fa intervenir no pas un o pocs electrons, sinó uns quants milers d'ions sodi i potassi, i la seva durada és de l'ordre del mil·lèsim de segon. Per aquest motiu, el ritme d'operació pot ser molt més ràpid en l'ordinador que en el cervell. Ara bé, els ordinadors clàssics són seqüencials, és a dir, realitzen les operacions una després de l'altra, mentre que en el cervell humà moltes operacions són realitzades en paral·lel, és a dir, simultàniament. Així, si bé l'ordinador clàssic és molt més ràpid que els humans en el càlcul, és més lent i més imprecís, en general, pel que fa a reconeixement i classificació de formes. Per aquest motiu, la comparació amb l'ordinador clàssic no és suficient, i actualment hom imagina el cervell com a ordinador en paral·lel, de manera que aquest constitueix una metàfora o model d'alguns aspectes del cervell, i aquest constitueix alhora un model per al progrés d'alguns aspectes del desenvolupament dels nous ordinadors en paral·lel. Intentar aconseguir ordinadors que comparteixin alguns aspectes de la intel·ligència humana és també un dels projectes importants de la ciència actual.

Així, no és d'estranyar que la intel·ligència artificial hagi aportat nous punts de vista a les reflexions sobre el cervell, la matèria i la intel·ligència. En particular, ha aportat dos tipus sofisticats de materialisme: fisicalisme i funcionalisme. En el primer, hom descriu totes les determinacions mentals a propietats físicoquímiques de la fisiologia del cervell, sense que sigui concebible cap descripció intermèdia. En el funcionalisme, s'estipula l'existència de descripcions intermediàries entre els estats mentals i els fenòmens materials en el cervell. Aquestes descripcions representen els estats mentals com a propietats d'un sistema material, és a dir, com a funcions abstractes independents de la realitat física del sistema en què es realitzen. Dos sistemes físicament diferents poden estar dotats de les mateixes funcionalitats i admeten els mateixos estats mentals.

Els especialistes en intel·ligència artificial, però, subratllen que no és imprescindible un funcionament semblant al del cervell per tenir activitats intel·ligents. Una metàfora utilitzada sovint es refereix al vol dels avions. Voler imitar el vol dels ocells no va conduir a artefactes voladors; sí que hi ha conduït, en canvi, imaginar maneres completament diferents de volar, com

ara l'ala estàtica dels avions usuals o les hèlixs dels helicòpters. Així, han tingut un èxit especial els anomenats sistemes experts, que funcionen segons una lògica seqüencial, i que pretenen no pas reproduir una intel·ligència humana global (amb afectes i emocions, a més de comprensió i lògica), sinó tan sols algunes característiques específiques, com ara l'experiència acumulada per un metge per al diagnòstic de malalties dintre d'una determinada especialitat. A partir del desenvolupament flexible d'uns qüestionaris, i de la informació prèvia introduïda, la màquina és capaç d'arribar a formular diagnòstics comparables als dels bons especialistes.

Els models cerebrals més utilitzats actualment són models connexionistes, basats en xarxes neuronals. A diferència de la metàfora de l'ordinador clàssic, instrument que funciona bàsicament en sèrie, els models connexionistes insisteixen sobre les possibilitats d'actuació en paral·lel, és a dir, de realització de moltes operacions simultànies, que obren l'elevadíssim grau d'interconnexions de les neurones en el cervell. Tot i que el model de partida és essencialment biològic, la física hi contribueix de dues maneres: afina els detalls quantitatius i conceptuals dels models mitjançant analogies amb vidres d'espín (models físics de la matèria magnètica desordenada), i permet la realització pràctica de xarxes neuronals electròniques i fotoelectròniques. Les xarxes neuronals han esdevingut un dels sistemes més estudiats en mecànica estadística. El punt de partida són models magnètics de vidres d'espín: cada neurona és representada com un espín, amb dos estats possibles (activada o no), i cada sinapsi pot assolir dos valors (activadora o inhibidora). Si les interaccions sinàptiques són simètriques, pot ser assignada una energia a cada estat d'aquest sistema, i una dinàmica que porta des dels estats de més energia als de menys energia. A diferència dels models del magnetisme clàssic, en què les interaccions vénen donades per paràmetres prefixats, ací les interaccions són també variables dinàmiques, que poden modificar-se segons certes regles d'aprenentatge. Les xarxes neuronals funcionen en paral·lel i es caracteritzen per un comportament global i robust i per una certa capacitat per corregir errors i aprendre nous comportaments.

El model connexionista té, malgrat els seus atractius múltiples, diverses limitacions importants: una precipitació excessiva a l'hora d'identificar propietats computacionals amb la consciència; una indiferència vers els aspectes subjectius a la relació entre ment fenomènica i ment computacional; l'excessiva arbitrarietat en els esquemes d'aprenentatge; l'excessiva llibertat quan combina subsistemes connexionistes i seqüencials. Les xarxes neuronals resulten ser un esquema massa potent, de possibilitats massa àmplies i universals, i el problema és com restringir-ne les possibilitats tot aplicant criteris de realisme neuronal. Entre els problemes que planteja trobem la consideració del temps, per exemple: les dificultats per relacionar les mesures de temps de processament,

tan importants en l'exploració psicològica, amb les activitats en paral·lel de la xarxa, o els problemes relacionats amb el funcionament sincronitzat o asíncron de les xarxes. Un altre dels problemes actuals rau en com combinar diverses xarxes, és a dir, en com relacionar xarxes i estructura cerebral: problemes de jerarquització de funcionament, de globalitat.

Des del punt de vista de l'emergentisme, és a dir, des de la consideració que, depassats un certs nivells de complexitat, la matèria adquireix certes propietats emergents que haurien resultat completament impredecibles al nivell de cada constituent per separat, ens fa ser avui més conscients que mai del paper essencial de la complexitat i l'estructura de la matèria per poder donar lloc a aquestes propietats emergents. Així, podríem considerar que l'esperit és una propietat emergent de la matèria cerebral, sense identificar massa precipitadament i biunívocament aquesta activitat amb la matèria que la sustenta? Cal, però, no confondre l'esperit amb l'ànima immortal, ja que un cop desapareguda la matèria de base, el cervell, també desapareixen les seves propietats emergents. Materialistes d'avui com Changeux o Crick són conscients de com resulta difícil reduir a purs mecanicismes característiques com la consciència, la intencionalitat, la subjectivitat dels estats mentals i la causalitat mental.

4.4. CONCLUSIONS

En considerar el gen o el cervell hem trobat dos camps fascinants de la ciència actual, que ens obren noves possibilitats d'actuació: l'enginyeria genètica, d'una banda, els fàrmacs neurotransmissors i la neurocirurgia, de l'altra. L'increment en la comprensió del gen i del cervell ens fa sentir alhora més lliures i més determinats. D'una banda, la divulgació científica ens fa més conscients que mai que ser primos o grassos, morir o no d'un càncer, viure amb ansietat o amb serenitat davant dels problemes, ser més o menys sensibles a la música, pot ser quelcom d'ineluctable, situat enllà de la nostra voluntat i de les nostres capacitats. El *deus ex machina* de la tragèdia grega és avui aquesta determinació biològica.

D'altra banda, la possibilitat d'actuar sobre el gen i el cervell ha obert una nova esperança pel que fa a guariments que abans resultaven impossibles, però alhora una sensació de por i desconfiança, perquè l'home d'aquest segle sap prou bé, després de les armes químiques de la primera guerra mundial i de les armes nuclears de la segona guerra, que qualsevol descobriment científic serà utilitzat, ineluctablement, per a finalitats perverses en un moment o

altre, siguin armes biològiques, amb noves espècies artificials resistents a les medicines actuals, sigui un control psicològic de la població mitjançant fàrmacs prou ben dosificats.

La cartografia del gen (projecte genoma) i la del cervell ens evoca l'exploració d'Àfrica o Oceania pels exploradors del segle passat. Se'ns havia promès Mart i la Lluna i no els tenim, però hem desembarcat en el gen i en el cervell. Gen i cervell apareixen impregnats d'història, com a subjectes de canvi, i, com aquells continents, amb zones misteriosament desconegudes, possibilitats de gran potencial econòmic, perills terribles...

La complexitat del cervell és comparable a la de tot un univers. Totes les galàxies interaccionen segons una mateixa llei, la de la gravetat. Les interaccions entre neurona i neurona, en canvi, són molt diverses, i depenen dels diversos neurotransmissors i moduladors i dels diversos receptors. El nombre de neurones i el de galàxies a l'Univers observable són comparables. La posició concreta d'una estrella en una galàxia és relativament irrellevant per al destí de la galàxies, però els detalls de l'alliberament de neuroreceptors poden ser crucials per al destí de les idees d'un cervell. Parlar d'un univers interior no és pas una metàfora, és una realitat.

5. CONCLUSIONS GENERALS

En aquest apartat final tractarem de resumir breument algunes de les principals idees que hem trobat al llarg d'aquestes consideracions sobre la visió actual de la matèria.

Matèria elemental

La matèria no és independent de l'observador; és una realitat no local. A diferència de l'àtom clàssic, postulat com a lloc de permanència, la matèria elemental ja no és el lloc de l'ésser immutable i etern, així com tampoc el buit ja no és el lloc del no-ésser i el repòs: tot és canvi, producció, anihilació, indeterminisme.

Matèria cosmològica

La matèria ha tingut un començament i l'Univers és una realitat dinàmica. El futur de l'Univers depèn del seu contingut en matèria. Aparentment, desconeixem el noranta per cent de la matèria que constitueix l'Univers. La matèria ens apareix impregnada d'història: formació dels nuclis més lleugers en l'Univers primordial, formació dels nuclis pesants en el si de les estrelles...

Matèria tecnològica

La matèria és tractada amb més cura: se n'exploren propietats subtils, se l'aprofita millor. La matèria, valor predominant en la tecnologia antiga, deixa

pas a la informació com a valor predominant. Les limitacions en els recursos no renovables, la contaminació atmosfèrica, l'increment de deixalles ens descobreixen una triple globalitat (en el temps, en l'espai i en el cicle productiu) en la qual estem immersos.

Matèria viva

Podem començar a actuar sobre el gen i el cervell i això, en lloc de fer-nos sentir més lliures, ens fa sentir més insegurs i més determinats per la matèria. La matèria viva esdevé matèria tecnològica i se'n apareix, alhora, plena d'història i canvi, en evolució.

* * *

En definitiva, el materialisme clàssic, el de la matèria com a realitat estable, eterna, instrumental, inerta, no és avui viable. La ciència ens ofereix una matèria ambigua i paradoxal en la seva elementalitat, saturada d'història en el nucli i en el gen, plena de possibilitats emergents en el cervell i la tecnologia, indicadora de globalitats universals, planetàries o conceptuals. Aquesta consideració de la matèria forma part, en certa manera, d'una certa espiritualitat d'avui: bé una espiritualitat de caràcter planetari, a l'estil d'un cert ecologisme que venera la Terra, o d'una espiritualitat de caràcter còsmic, com l'expressada per Teilhard de Chardin en el seu *Himne a la matèria*.

Algunes perspectives en l'estat actual de l'estudi científic de la matèria representen una crisi o un repte per a diverses de les teories filosòfiques sobre la matèria. Segurament, els representants d'aquestes, en sentir-se interpel·lats, podran proposar noves interpretacions o respostes a les qüestions plantejades ací. Aquestes visions acostumen a tenir influència en les relacions entre ciència, religió i art.

Així, el materialisme, vist com a negació de cap altra realitat que no sigui la matèria o, més en abstracte, vist com a negació de cap element transcendent al món, és una forma d'ateisme. Avui, però, el materialisme es troba en una situació en què la matèria és menys nítida del que es pensava, la realitat és més global i menys determinista, i no és tan fàcil oposar frontalment una matèria eterna, sòlida, tangible, sensible i irrefutable a un esperit hipotètic i fantasmagòric. El cristianisme, teologia de l'encarnació, no renega en principi de la matèria, ans l'enalteix i la celebra: matèria creada, matèria capaç de

sostenir complexitats que arribin a l'esperit, matèria instrumental però digna de respecte.

Sovint en la pràctica de l'art, la forma ha dominat la matèria, tot i que aquesta, és clar, ha jugat un paper decisiu en les possibilitats de l'art. En aquest segle, però, la matèria ha esdevingut, en alguns artistes (Tàpies, per exemple), el protagonista de l'obra d'art, amb una sensibilitat especial pels matisos i la diversitat de la matèria. D'altra banda, la fabricació i exploració de nous materials, presenta també un repte als artistes, per assimilar les noves possibilitats que aquests obren.

Finalment, pel que fa a la mateixa ciència, resulta difícil, en algunes branques si més no, ser exclusivament i bel·ligerantment materialista. La ciència d'avui ens ensenya com la visió de la matèria pot variar. Un prejudici materialista podria ser contraproduent: ho hauria estat en el desenvolupament de la mecànica quàntica. Un materialisme massa rígid hauria portat, també, a rebutjar la idea de camp, quelcom d'immaterial que es propaga entre partícules.

En definitiva, però, la ciència ens ajuda a formular, una vegada més, i amb noves potencialitats i nous mètodes, qüestions que s'ha posat i se seguirà posant la filosofia. Convé que ni ciència ni filosofia no negligixin el diàleg.

6. BIBLIOGRAFIA

6.1. BIBLIOGRAFIA GENERAL

La bibliografia sobre cadascun dels temes tractats en aquest breu assaig és amplíssima, tant des de la perspectiva científica com des del punt de vista filosòfic. Esmentaré aquí, tan sols, algunes de les obres que he utilitzat en la preparació d'aquest treball.

Introducció

BACHELARD, G. *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*. París: Presses Universitaires de France, 1955.

DAVIES, P. C. [ed.] *The new physics*. Cambridge University Press, 1989.

DAVIES, P. C.; GRIBBIN, J. *Los mitos de la materia*. Madrid: Mc Graw-Hill, 1994.

LAÍN ENTRALGO, P. *Cuerpo y alma*. Madrid: Austral, 1993.

MOULINES, C. U. *Exploraciones metacientíficas*. Madrid: Alianza Universidad, 1982.

PENROSE, R. *La nueva mente del emperador*. Madrid: Biblioteca Mondadori, 1991.

Matèria elemental

COHEN-TANOUDJI, G; SPIRO, M. *La materia-espacio-tiempo*. Madrid: Espasa, 1988.

CLOSE, F. *La cebolla cósmica*. Barcelona: Crítica, 1988.

- ESPAGNAT, B. D'. *En busca de lo real*. Madrid: Alianza Universidad, 1983.
- FARRINGTON, B. *Ciencia y filosofía en la Antigüedad*. Barcelona: Ariel, 1981.
- NICOLAU, F. *La constitució de la matèria. Dels quatre elements als quarks*. Barcelona: Edicions Terra Nostra, Catalunya Cristiana, 1986.
- ORTOLI, S.; PHARABOD, J. P. *El cántico de la cuántica ¿Existe el mundo?* Barcelona: Gedisa, 1987.

Matèria cosmològica

- HAWKING, S. *Breu història del temps*. Barcelona: Crítica, 1988.
- REEVES, H. *Paciència dins l'atzur*. Barcelona: Empúries, 1985.
- SALVADOR, E. *L'Univers conegut, avui*. Barcelona: Barcanova, 1992.
- THUAN, T. X. *La mélodie secrète*. París: Fayard, 1988.
- WEINBERG, S. *Los tres primeros minutos del Universo*. Madrid: Alianza editorial, 1978.

Matèria tecnològica

- CLAESSENS, M. *Los descubrimientos científicos contemporáneos*. Barcelona: Gedisa, 1989.
- DURAN, X. *En el llindar del futur*. Barcelona: Proa (Club de butxaca), 1990.
- *L'esperit de la ciència*. València: Tres i Quatre, 1991.
- DIVERSOS AUTORS. *Europa científica*. Barcelona: Labor, 1992.
- FLANAGAN, D. *La ciencia ante el siglo XXI*. Madrid: Temas de hoy, 1989.
- HARMAN, P. M. *Energía, fuerza y materia*. Madrid: Alianza Universidad, 1989.
- RIERA I TUEBOLS, S. *Més enllà de la cultura tecnocientífica*. Barcelona: Edicions 62, 1994.
- WAGENSBERG, J. *Ensayo sobre la complejidad del mundo*. Barcelona: Tusquets, 1987.

Matèria viva

- CHANGEUX, J. P. *El hombre neuronal*. Madrid: Espasa Calpe, 1986.
- CRICK, F. *La búsqueda científica del alma*. Madrid: Debate, 1994.
- DAWKINS, R. *El gen egoísta. Las bases biológicas de nuestra conducta*. Barcelona: Salvat, 1985.
- DELBRUCK, M. *Mente y materia*. Madrid: Alianza editorial, 1988.
- DURAN, X. *El cervell polièdric*. València: Edicions Bromera, 1996.

- FERRATER MORA, J. *De la materia a la razón*. Madrid: Alianza, 1979.
- GANASCIA, J. G. *L'âme-machine*. París: Seuil, 1990.
- LAÍN ENTRALGO, P. *Cuerpo y Alma*. Madrid: Austral, 1991.
- MAUREL, M. C. *Les origines de la vie*. París: Syros, 1994.
- MORA, F. [ed.] *El problema cerebro-mente*. Madrid: Alianza editorial, 1995.
- NICOLAU, F. *El cervell i l'ànima humana*. Barcelona: Catalunya Cristiana, 1990.
- PENROSE, R. *La nueva mente del emperador*. Madrid: Biblioteca Mondadori, 1991.
- POPPER, K. L.; ECCLES, J. C. *El Yo y su cerebro*. Barcelona: Labor, 1985.
- PRIEST, S. *Theories of the mind*. Londres: Penguin, 1991.
- SCHRÖDINGER, E. *Mente y materia*. Barcelona: Tusquets, 1983.
- *Què es la vida?* Barcelona: Tusquets, 1983.
- TOBEÑA, A. *El cervell eròtic*. Barcelona: Edicions la Campana, 1995.

6.2. OBRES CIENTÍFIQUES DE L'AUTOR

En català

- JOU, D. *Equacions de Gibbs generalitzades i extensió de la termodinàmica de processos irreversibles*. Institut d'Estudis Catalans. Barcelona: 1983. [Premi Eduard Fontserè, 1981.]
- JOU, D. *Introducció a la termodinàmica de processos biològics*. Institut d'Estudis Catalans. Barcelona: 1984.
- JOU, D. *Mecànica estadística i biologia molecular*. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona, 1989.

En castellà

- JOU, D.; LLEBOT, J. E.; PÉREZ GARCÍA, P. *Física para las ciencias de la vida*. Madrid: Mc Graw Hill (Serie Schaum), 1986. [Segona edició, ampliada, 1994.]
- JOU, D. i LLEBOT, J. E. *Introducción a la termodinámica de procesos biológicos*. Barcelona: Labor, 1989.

En francès

- JOU, D.; LLEBOT, J. E. *Introduction à la thermodynamique des processus biologiques*. París: Lavoisier Tec/Doc, 1990.

En anglès

- JOU, D.; LLEBOT, J. E. *Introduction to the thermodynamics of biological processes*. New York: Prentice Hall, 1990.
- JOU, D.; CASAS-VAZQUEZ, J.; LEBON, G. *Extended irreversible thermodynamics*. Berlín: Springer Verlag, 1993. [Premi Ciutat de Barcelona, 1993.] [Segona edició, ampliada, 1996.]

Obres de divulgació i assaig

- JOU, D.; SEMIR, V. DE. *Diàlegs a Barcelona (Ciència i cultura)*. Barcelona: Ajuntament de Barcelona, 1992.
- JOU, D.; BAIG, M. *La naturaleza y el paisaje*. Barcelona: Editorial Ariel, 1993.
- JOU, D. *Algunes reflexions sobre ciència i fe*. Barcelona: Quaderns de la Fundació Joan Maragall, 1992.



