



MICROCOSMOS

Quatre mil milions d'anys d'evolució
des dels nostres ancestres microbians

• **Lynn Margulis
i Dorion Sagan**

UBe

omniscellula

MICROCOSMOS

**Quatre mil milions d'anys d'evolució
des dels nostres ancestres microbians**

• **Lynn Margulis
i Dorion Sagan**

• Presentació de Lewis Thomas

• Traducció d' Albert Lloret i Falo



Índex

11

Presentació de Lewis Thomas (1986)

15

Prefaci a la segona edició (1991/1997)

25

Agraïments

27

Introducció: el microcosmos

37

Capítol 1

A partir del cosmos

45

Capítol 2

L'animació de la matèria

57

Capítol 3

El llenguatge de la natura

67

Capítol 4

Endinsant-nos al microcosmos

81

Capítol 5

El sexe i l'intercanvi genètic universal

93

Capítol 6

L'holocaust d'oxigen

107

Capítol 7

Cèl·lules noves

119

Capítol 8

La convivència

129

Capítol 9

El cervell simbiòtic

147

Capítol 10

L'enigma del sexe

159

Capítol 11

Els darrers en proliferar: els animals i les plantes

181

Capítol 12

L'home egocèntric

219

Capítol 13

El supercosmos del futur



Presentació

● **Lewis Thomas Lewis Thomas (1913-1993)**

Metge i president emèrit del Centre Oncològic Memorial Sloan-Kettering

Un pròleg sol advertir el lector d'allò que es trobarà en el llibre. En el cas d'aquest llibre, tret que el lector o la lectora estigui ben al corrent de tot el que ha ocorregut recentment en els camps de la microbiologia, la paleontologia i la biologia evolutiva, se les haurà de veure amb una sorpresa rere una altra, potser fins i tot amb una sobresalt rere un altre. Aquest llibre tracta sobre la complexa interconnectivitat de totes les criatures del planeta, de les que ara hi viuen i de les incomptables que hi van viure abans. Margulis i Sagan proposen una nova manera de veure el món, diferent de la visió que se'n solia tenir unes dècades enrere. Aquest nou punt de vista es basa en les sòlides recerques que científics de laboratoris de tot el planeta han portat a terme amb diferents finalitats. Els seus descobriments, recopilats i posats en relació els uns amb els altres, porten a la conclusió que, a la natura, és impensable portar una existència separada dels altres organismes. La biosfera és tota d'una peça, un sistema vivent immens i integrat, un organisme.

Recordo haver assistit fa molt de temps, en el campus d'una universitat, a un cicle de seminaris que es titulava de manera oficial "El lloc de l'home a la natura". Principalment, tractava sobre la manera com l'home pot arreglar i millorar la natura per tal que els assumptes del món poguessin seguir endavant de forma més convenient: obtenint més recursos energètics de la Terra, preservant certes àrees salvatges per al nostre plaer, evitant la contaminació dels cursos d'aigua, controlant la població humana..., coses d'aquesta mena. El sentit general que es podia extreure d'aquell cicle era que la natura és una propietat, una herència posseïda i administrada per la humanitat, una mena de combinació entre jardí públic, zoològic i hort de fruites i verdures.

Si ens aturem a pensar-hi, aquesta és encara la manera més fàcil de veure el món. És cert que els éssers humans semblen l'espècie dominant, la que ha estat manant al planeta durant gairebé tot el període que portem ocupant-lo. Potser al principi sí que érem fràgils, criatures imperfectes, acabades de baixar dels arbres; que no podien presumir de res, tret d'uns polzes oposables als altres dits de la mà i d'uns lòbuls frontals exagerats, que s'amagaven en coves i estudiaven el foc. Però vam acabar prenent el control, i ara sembla que estem per tot arreu, dominant-ho tot, de pol a pol, dels cims de les muntanyes a les fosses marines, colonitzant la Lluna i observant el sistema solar. Som el cervell de la Terra, la cúspide de l'evolució, l'èxit biològic més sorprenent, que va venir per quedar-s'hi per sempre.

Però hi ha una altra manera de veure'ns, i aquest llibre n'és una guia. En termes evolutius, tot just acabem d'arribar. Hi deu haver espècies més joves que la nostra, per aquí i per allà, però no n'hi cap de la nostra magnitud, de segur que cap que estigui tan al principi en el seu desenvolupament. Si ens remuntem encara no uns milers d'anys enrere, perdem de vista ràpidament les característiques que ara creiem que defineixen del cert la forma humana, aquella que és capaç de parlar, de cantar, de construir eines, d'encendre foc, de buscar la comoditat i de fer la guerra. Així doncs, som una espècie jove que, potser, tan sols està començant a desenvolupar-se, i que encara està aprenent a ser humana. Som només la criatura immadura d'una espècie, immadura i vulnerable, encara propensa a equivocar-se, en perill que només en quedi una fina capa de fòssils radioactius.

Per millorar la nostra perspectiva, una de les coses que hem d'adreçar és la del llinatge. Abans crèiem que havíem arribat aquí *de novo*, i que l'Encarregat ens havia posat on érem, potser sense massa roba, però que, en qualsevol cas, estàvem preparats per posar nom a tots els animals. Aleshores, després de Darwin, vam haver de passar per la vergonya de tenir els simis per allà en algun lloc del nostre arbre genealògic, i per cosins els ximpanzés.

Molts nens travessen un període desagradable al principi de l'adolescència, en el qual se senten incòmodes amb els pares que els ha tocat, i preferirien que fossin diferents, més semblants als de la casa del costat. El fet de tenir uns antecessors homínids d'aparença estranya no hauria de ser motiu de vergonya. Amb

tot, si poguéssim escollir, la majoria de nosaltres preferiríem remuntar la nostra espècie fins a una dinastia de reis i reines, aturar-nos aquí i no mirar més enllà.

Però vet aquí el dilema: el primer dels nostres, ben bé el primer de la nostra estirp, aparegut en algun moment fa uns 3.500 milions d'anys, va ser la cèl·lula individual d'un bacteri, el protoancestre de tota la vida posterior. D'entre tots els orígens possibles, provenim d'aquest.

A més a més, amb tota l'elegància i l'eloqüència que tenim com a espècie, amb els nostres grans lòbuls frontals, amb tota la nostra música, doncs resulta que no hem progressat gaire des dels nostres avantpassats: ells encara estan amb nosaltres, són part de nosaltres. O, per dir-ho d'una altra manera, nosaltres som part d'ells.

Un cop l'hem acceptada, aquesta gran història pren les dimensions d'una meravellosa epopeia que no es troba, ni de bon tros, a prop del final: és la saga de la vida al planeta, ni més ni menys.

Lynn Margulis ha dedicat la major part de la seva vida professional a estudiar els detalls d'aquesta història, i a partir de les seves investigacions científiques n'afegit d'altres de significatius. Ara, juntament amb Dorion Sagan, ho ha aplegat tot, literalment, en aquest llibre extraordinari, que és diferent de qualsevol altre tractament divulgatiu de l'evolució amb el qual m'hagi trobat mai abans. És un relat fascinant de la que és, de lluny, l'etapa més llarga en l'evolució de la biosfera, el període de 2.500 milions d'anys en el qual els nostres ancestres microbians, tots sols, van establir la majoria de les normes i reglaments per a la convivència, uns hàbits que nosaltres els éssers humans hauríem d'estar examinant per trobar-hi pistes per a la nostra supervivència.

La major part de les històries més famoses sobre l'evolució i els seus problemes comencen només alguns centenars de milions d'anys enrere; donen compte breument de les formes més antigues d'organismes multicel·lulars, i passen ràpidament a la victoriosa invenció de les formes vertebrades, donant a entendre que tot el temps anterior estava ocupat per cèl·lules "primitives" o "simples", que no feien sinó esperar que comencés l'espectacle de debò. Margulis i Sagan posen remei a aquesta mala interpretació de l'origen de la vida en demostrar

que els bacteris més antics havien après pràcticament tot allò que es pot aprendre de viure en un sistema, i que és, principalment, el que avui en sabem.

Podria ser que haguéssim compartit un pressentiment sobre els nostres orígens reals durant més temps que no ens pensem, sota la forma d'un fòssil lingüístic, enterrat a l'arrel del nom que designa la nostra espècie. Als inicis de les llengües indoeuropees, fa milers d'anys (ningú no sap del cert quants), la paraula per a *terra* era *dhghem*. D'aquesta paraula, que volia dir simplement *terra*, prové la paraula *humus*, que és el producte de l'activitat dels bacteris del sòl. A més, perquè ens serveixi de lliçó, de la mateixa arrel provenen també els termes *humil* i *humà*. Aquest seria l'esquema de la paràbola; el llibre ens en dóna alguns detalls més.

Introducció

• EL MICROCOSMOS

Quan observem la vida a la Terra, podem creure fàcilment que som éssers supremes. El poder de la nostra consciència, el de la nostra societat i el de les nostres invencions tècniques ens han fet creure que som la forma de vida més avançada del planeta. Ni tan sols la gran foscor de l'espai ha aconseguit de fer-nos més humils. Veiem l'espai com una terra de ningú, que hem de penetrar i conquerir de la mateixa manera que creiem haver conquerit la Terra.

Tradicionalment, la vida a la Terra s'ha estudiat com un pròleg a l'arribada dels éssers humans, i s'ha considerat que ens han precedit formes de vida inferiors, mancades d'intel·ligència, i que ara ens trobem a la cúspide de l'evolució. Ens creiem semblants a Déu; fins al punt que pensem tenir l'evolució a les mans quan manipulem el DNA, la maquinària motriu de la vida, segons els nostres interessos. Si estudiem el microcosmos, l'antic món dels microorganismes, és només per descobrir-hi els mecanismes secrets de la vida, per tal de prendre'n el control i potser fins i tot per poder perfeccionar-nos i fer més perfectes les altres criatures vivents a la Terra.

Però durant les darreres tres dècades les ciències de la vida han viscut una revolució: proves fòssils de vida microbiana primigènia, la descodificació del DNA i alguns descobriments sobre la composició de les nostres pròpies cèl·lules han desmentit un seguit d'idees establertes sobre els orígens de la vida i sobre la dinàmica evolutiva a la Terra.

Primer de tot, aquestes proves han demostrat fins a quin punt és forassenyat considerar que les persones som especials, que estem separades de les

altres espècies i per sobre de totes elles. Gradualment, el microscopi ens ha anat revelant la immensitat del microcosmos, i ara ens està donant una visió alarmant del nostre veritable lloc a la natura. Ara sembla ser que els microbis (també anomenats microorganismes, gèrmens, protozous i bacteris, depenent del context) no només són les peces bàsiques de la vida, sinó que també ocupen, d'una manera indispensable, cadascuna de les estructures vitals conegudes actualment a la Terra. Des del parameci fins al gènere humà, totes les formes de vida estan meticulosament organitzades i composades a partir de sofisticades agregacions de vida microbiana en evolució. Lluny d'haver-los deixat enrere en "l'escala" evolutiva, els microorganismes ens envolten i ens constitueixen. En haver sobreviscut des del començament de la vida, al llarg d'una línia sense ruptures que arriba fins a l'actualitat, tots els organismes són igual d'evolucionats.

Si comprenem això, podrem apreciar nítidament que intentar de mesurar l'evolució en una progressió lineal, des d'allò que és simple i "inferior", a allò que és complex, amb els éssers humans al capdamunt de la jerarquia, com a formes màximes i absolutes, és una vanitat i una presumpció. Com veurem, els organismes més senzills i antics no només són els precursors i el substrat de la biota terrestre del present, sinó que estan preparats per expandir-se i transformar-se amb la resta de la vida, sempre que nosaltres els humans, organismes "superiors", no siguem tan rucs d'anihilar-nos.

A més, aquella visió distorsionada de l'evolució, de la noció darwiniana de la "supervivència dels més aptes" com una competició sagnant de tipus crònic entre els individus i entre les espècies, es dissol davant d'una nova visió del procés entre les formes de vida com a cooperació continuada, interacció estreta i dependència mútua. La vida no va establir-se a la Terra a força de combat, sinó a través de contactes. Les diferents formes de vida es van multiplicar i es van fer més complexes coadoptant altres formes de vida, no destruint-les.

Com que no podem veure el microcosmos a ull nu, tendim a obviar-ne la seva significació. Amb tot, dels 3.500 milions d'anys que fa que la vida existeix a la Terra, la història sencera de la humanitat, des de les caveres fins a les cases adossades, en representa menys d'un 1%. La vida va originar-se a la Terra molt al principi de la seva història com a planeta, i durant els primers 2.000 milions d'anys els únics habitants n'eren els bacteris.

En efecte, els bacteris i la seva evolució són tan significatius que la divisió fonamental de les formes de vida a la Terra no és entre plantes i animals, com se sol suposar, sinó entre procariotes (organismes compostos de cèl·lules sense nucli, és a dir, els bacteris) i eucariotes (tota la resta de formes de vida)¹⁰. Durant els primers 2.000 milions d'anys a la Terra, els procariotes van transformar de manera continuada la superfície de la Terra i l'atmosfera. Van inventar en miniatura tots els sistemes químics que són essencials per a la vida, un assoliment al qual la humanitat ni tan sols s'hi ha arribat a acostar. Aquesta antiga i avançada biotecnologia va portar el desenvolupament de la fermentació, de la fotosíntesi, l'ús de l'oxigen en la respiració i va suposar la fixació del nitrogen atmosfèric. També va portar crisis de fam, contaminacions i extincions a escala mundial, molt abans de l'aparició d'altres formes de vida més grans.

Aquests turbulents esdeveniments al principi de la història de la vida van succeir com a resultat de la interacció d'almenys tres dinàmiques evolutives descobertes recentment. La primera és l'hàbil orquestració del DNA. Identificat el 1944 com la substància transmissora de l'herència per Oswald T. Avery, Colin MacLeod i Maclyn McCarty, als anys 60 se'n va desxifrar el codi, després que James Watson i Francis Crick en van revelar el mètode de duplicació el 1953. Les cèl·lules vives, governades pel DNA, poden fer còpies de si mateixes, desafiant la mort i mantenint la seva identitat mitjançant la replicació. Amb tot, les cèl·lules són susceptibles a la mutació (un fenomen que en potineja a l'atzar la seva identitat), i tenen doncs la capacitat de sobreviure el canvi.

10. Els eucariotes comprenen totes les espècies dels ben coneguts regnes de les plantes i dels animals, i les dels no tan coneguts regnes dels fongs i dels protists. Amb l'informal terme de *protist* ens referim als microbis, sovint unicel·lulars, del regne dels protists. Els fongs unicel·lulars s'anomenen llevats. Es considera part dels protists totes les amebes, els ciliats, els paràsits que causen malària (i, en general, els protozous), les diatomees, les algues, els fongs mucilaginosos, les floridures aquàtiques, els plasmodis paràsits de plantes i altres organismes més obscurs que no encaixen en els altres regnes. S'estima que actualment existeixen unes 250.000 espècies de protists, agrupades en cinquanta tipus, si bé la major part d'aquests organismes s'ha extingit. Els altres tres regnes eucariotes, en ordre d'evolució, són: Animals, els quals es desenvolupen a partir d'embrions formats per la fusió d'un espermatozoide amb un òvul; Fongs, floridures, bolets, llevats, rovells i organismes relacionats que es desenvolupen a partir d'espores; i Plantes, molses, herbes fetgeres, falgueres, coníferes i plantes amb flors, les quals es desenvolupen a partir d'embrions envoltats per teixit matern. El cinquè regne, i el primer grup d'éssers vius a evolucionar, és el regne Procariota, compost per bacteris (procariotes) en la seva totalitat. Els diferents noms dels bacteris (moneres, procariotes, gèrmens, etc.) provenen de les diverses tradicions d'estudi o camps científics que els han investigat. (La història natural, la botànica, la microbiologia, la medicina, l'agricultura i la zoologia segueixen diferents tradicions, sovint contradictòries, a l'hora d'identificar, denominar i classificar els microbis). El terme *microbi* no té cap significat específic per a la taxonomia ni l'evolució, i equival a *microorganisme*, qualsevol organisme observable, principalment, a través del microscopi. Tots els organismes procariotes i molts dels eucariotes, com els protists i els fongs, són també microbis en la mesura en què no podem observar-los a ull nu. Com que *microorganisme* i *microbi* són sinònims, en aquest llibre utilitzarem normalment el terme *microbi*, que té connotacions més biològiques i menys mèdiques.

La segona dinàmica evolutiva és una mena d'enginyeria genètica natural. El camp de la bacteriologia n'ha anat acumulant proves durant molt de temps. Al llarg dels últims cinquanta anys, aproximadament, els científics han anat observant que els procariotes transfereixen, de manera rutinària i veloç, diversos fragments de material genètic a d'altres individus. Tot bacteri, en qualsevol moment, pot utilitzar gens accessoris, provinents a vegades de soques molt diferents, els quals porten a terme funcions que el seu propi DNA no pot realitzar. Alguns d'aquests fragments de material genètic es recombinen amb gens del DNA de la mateixa cèl·lula, d'altres segueixen circulant i són transferits a altres cèl·lules. Alguns d'aquests fragments genètics visitants també poden desplaçar-se amb facilitat cap a l'interior de l'aparell genètic de cèl·lules eucariotes com les nostres.

Aquests intercanvis són una activitat estàndard del repertori procariota. Amb tot, encara avui hi ha molts bacteriòlegs que no n'acaben de copsar el significat complet, és a dir, que tots els bacteris del món, com a conseqüència d'aquestes habilitats, tenen accés a una única reserva de gens, i doncs, als mecanismes adaptatius del regne bacterià sencer. La velocitat de recombinació és superior respecte la de mutació: els organismes eucariotes podrien trigar un milió d'anys abans no s'ajustessin a un canvi a escala mundial, mentre que els bacteris s'hi podrien adaptar en uns pocs anys. Adaptant-se constantment i ràpidament a les condicions ambientals, els organismes del microcosmos són la base de la biota sencera del planeta, ja que la seva xarxa d'intercanvi global afecta, en última instància, totes les plantes i tots els animals vius. Els éssers humans tot just comencem a aprendre aquestes tècniques a partir de la ciència de l'enginyeria genètica, a través de la qual s'obtenen components bioquímics introduint gens aliens en cèl·lules en reproducció. Però els procariotes han estat fent servir aquestes "noves" tècniques durant milers de milions d'anys. El resultat n'és un planeta fèrtil i habitable per formes de vida més grans, mitjançant un superorganisme mundial de bacteris, comunicatiu i cooperatiu.

Malgrat el gran abast de la mutació i de la transferència genètica dels bacteris, aquests dos fenòmens per si sols no donen compte de l'evolució de totes les formes de vida a la Terra en l'actualitat. Un dels descobriments més emocionants de la microbiologia moderna ha estat la troballa de pistes que condueixen cap a una tercera via de canvi, apareguda com a resultat de l'observació dels mitocondris, òrgànuls embolcallats en membranes que es troben a l'interior de

les cèl·lules dels animals, de les plantes, dels fongs i dels protists. Encara que es trobin a l'exterior del nucli de les cèl·lules modernes, els mitocondris tenen uns gens propis compostos de DNA. Els mitocondris es reproduïxen en un moment diferent al de la resta de la cèl·lula i, a diferència de les cèl·lules en les quals habiten, els mitocondris es reproduïxen per divisió binària. Sense mitocondris, les cèl·lules amb nucli, i per tant, la planta o l'animal, no podrien utilitzar l'oxigen i, doncs, no podrien viure.

Especulacions posteriors van portar els biòlegs a plantejar una situació sorprenent: que els descendents dels bacteris que nedaven en els mars primigenis i respiraven oxigen fa 3.000 milions d'anys existeixen encara avui, dins dels nostres cossos, en la forma de mitocondris. En un moment donat, els antics bacteris s'haurien combinat amb altres microorganismes, i hi haurien establert la seva residència a l'interior. En aquesta situació, els mitocondris haurien col·laborat en l'eliminació de residus i en l'aportació d'energia derivada de l'oxigen, a canvi d'aliment i refugi. Els nous organismes fusionats haurien continuat evolucionant cap a formes de vida més complexes que respirarien oxigen. Aleshores hauria tingut lloc un mecanisme evolutiu més sobtat que la mutació: una aliança simbiòtica que hauria esdevingut permanent, la creació d'organismes que no són sols la suma de les seves parts simbiòtiques, sinó quelcom de més semblant a la suma de totes les combinacions possibles de les seves parts. Aquesta mena d'aliances va empènyer els éssers en evolució cap a reialmes inexplorats. La simbiosi, la fusió d'organismes en col·lectius nous, ha demostrat ser una força de canvi fonamental a la Terra¹¹.

En examinar-nos com a productes de la simbiosi al llarg de milers de milions d'anys, resulten aclaparadores les proves que donen suport a l'existència d'un ancestre multimicrobià de la nostra espècie. Els nostres cossos contenen una autèntica història de la vida a la Terra. Les nostres cèl·lules mantenen un ambient ric en carboni i hidrogen: igual que el de la Terra quan hi va començar

11. Per a una introducció divulgativa dels grups i de les propietats principals dels éssers vius, vegeu L. Margulis i D. Sagan. *What Is Life?* Nova York: A. Peter Nevraumont Book/Simon & Schuster, 1996; i per a una perspectiva més tècnica de la taxonomia, vegeu L. Margulis i K.V. Schwartz. *Five Kingdoms*. Nova York: W.H. Freeman, 1997. Hi ha biòlegs que encara rebutgen l'origen simbiòtic dels mitocondris, dels cloroplasts i d'altres òrgans eucariotes. Són, cada vegada més, una minoria. És d'esperar que el pes de les proves presentades en aquest llibre convencerà aquests biòlegs, i a tothom, de la necessitat de considerar la vida com un fenomen simbiòtic. Per a una aproximació tècnica a l'evolució primitiva, vegeu L. Margulis. *Symbiosis in Cell Evolution*. 2a ed. Nova York: W.H. Freeman, 1993.

la vida. Aquestes cèl·lules viuen en un ambient aquàtic amb una composició de sals minerals similar a la dels mars primitius. Vam esdevenir el que som com a resultat de la reunió d'un seguit de col·laboradors bacterians en un ambient aquós. Encara que les dinàmiques evolutives del DNA, de la transferència genètica i de la simbiosi no es van descobrir fins gairebé un segle després de la mort de Charles Darwin el 1882, Darwin va tenir la perspicàcia d'escriure: "No podem desentranyar la meravellosa complexitat d'un ésser orgànic, però en la hipòtesi que hem anticipat aquí, aquesta complexitat ha augmentat molt. Cada criatura vivent ha de ser vista com un petit microcosmos, un petit univers format d'una host d'organismes autopropagatoris, inimaginablement diminuts i tan nombrosos com les estrelles del cel"¹². Precisament, aquest llibre tracta sobre l'estranya natura d'aquest petit univers.

L'estructura detallada de les nostres cèl·lules traeix els secrets dels seus ancestres. Imatges de microscòpia electrònica de les cèl·lules nervioses de tots els animals revelen un bon nombre de conspicus "microtúbuls". Tant els cilis ondulants de les cèl·lules que recobreixen les parets de les nostres goles, com les cues fuetejants dels espermatozoides humans, comparteixen la mateixa disposició inusual de microtúbuls amb la forma de "disc-marcador" dels antics telèfons, la mateixa forma que els cilis dels ciliats, un grup de prolífers microbis que comprenen més de 8.000 espècies diferents. Aquests mateixos microtúbuls apareixen cada vegada que les cèl·lules de les plantes, dels animals i dels fongs es divideixen. De manera prou enigmàtica, els microtúbuls de les cèl·lules en divisió estan fets d'una proteïna gairebé idèntica a algunes de les que s'han trobat a les cèl·lules del cervell; i aquesta proteïna s'assembla a algunes que s'han trobat en certs bacteris de locomoció ràpida, uns bacteris que pensem que es troben entre els nostres ancestres.

Aquestes i altres relíquies vivents d'organismes que havien estat independents i que hem detectat a l'interior d'una gran quantitat d'espècies fan cada vegada més evident que tots els organismes visibles han evolucionat a través de la simbiosi, l'acoblament que porta a la interdependència física i a la compartició de cèl·lules i cossos. Encara que, com veurem, alguns detalls de l'origen bacterià dels microtúbuls, dels mitocondris i d'altres parts cel·lulars són

12. Charles Darwin. *The Variation of Animals and Plants under Domestication*. 2 vols. Nova York: Organe Judd, 1868. 2: 204.

difícils d'explicar, tots aquells científics que estan familiaritzats amb l'estil de vida del microcosmos estan d'acord amb l'esquema general del funcionament de l'evolució per simbiosi.

El procés simbiòtic no cessa. Nosaltres, organismes del macrocosmos, seguim depenent els uns dels altres, continuem interactuant i depenent del microcosmos. Certes famílies de plantes (com la família dels pèsols, incloent-hi els propis pèsols, les mongetes, i altres espècies afins, com el trèvol i la veça) no poden viure en un sòl pobre en nitrogen, sense els bacteris que fixen aquest element als nòduls de les seves arrels. Nosaltres mateixos tampoc podem viure sense el nitrogen que prové d'aquestes plantes. Ni les vaques ni els tèrmits poden digerir la cel·lulosa de l'herba i de la fusta sense les comunitats de microbis que habiten al seu aparell digestiu. Tot un 10% del pes sec del nostre cos consisteix en bacteris, sense alguns dels quals, encara que no siguin parts congènites del nostre cos, no podríem viure. No es tracta d'una mera excen- tricitat de la natura; aquest tipus de coexistències són la matèria primera de l'evolució. Imaginem, per exemple, que l'evolució continuï alguns milions d'anys més, i que aquells microorganismes que produeixen vitamina B₁₂ als nostres intestins acabin esdevenint part de les nostres cèl·lules. Un agregat de cèl·lules especialitzades pot acabar convertint-se en un òrgan. Al laboratori hem pogut ser testimonis de la unió d'amebes amb bacteris que havien estat letals, i que han creat, amb el temps, una nova espècie d'ameba híbrida.

Aquesta revolució en l'estudi del microcosmos ens posa al davant una visió imponent. No hauria de semblar ridícul postular que a la mateixa consciència que ens permet d'indagar l'activitat de les nostres cèl·lules, podria haver nascut de les capacitats conjuntes de milions de microbis que van evolucionar simbiòticament per formar el cervell humà. Actualment, aquesta consciència ens ha dut a manipular el DNA, i hem començat a intervenir en els antics processos de transferència genètica dels bacteris. La nostra capacitat de crear nous tipus de vida es podria considerar una nova manera d'aguditzar encara més la memòria orgànica (el record i l'activació del passat de la vida en el present). En un dels gegantins bucles autoreferencials de la vida, el mateix DNA canviant ens ha portat a ser conscients que podem modificar-lo. La curiositat, la set de coneixement, l'entusiasme per entrar a l'espai i difondre les nostres recerques i l'espècie en altres planetes i més enllà, representen la punta de llança de les

estratègies vitals d'expansió que van començar al microcosmos fa uns 3.500 milions d'anys. No som sinó reflexes d'una corrent antiquíssima.

Des dels primers bacteris primordials fins al present, han viscut i han mort miríades d'organismes formats simbiòticament, però el comú denominador microbià roman sense canvis essencials. El nostre DNA, en una seqüència ininterrompuda, deriva de les molècules de les primeres cèl·lules que es van formar a les ribes dels primers oceans càlids i poc profunds. Els nostres cossos, com els de tots els éssers vius, preserven l'ambient de la Terra primitiva. Coexistim amb microbis d'avui, i amb restes encobertes d'altres, simbiòticament incorporats a l'interior de les nostres cèl·lules. D'aquesta manera, el microcosmos segueix vivint en nosaltres i nosaltres en ell.

Algunes persones podrien trobar aquesta noció pertorbadora, incòmoda. A banda de fer esclatar el globus inflat en excés que és la nostra presumpció de sobirania humana sobre la resta de la natura, aquesta idea posa en qüestió les nostres idees d'individualitat, de particularitat i d'independència. Fins i tot viola la nostra visió de nosaltres mateixos com a éssers vivents discrets, separats de la resta de la natura. El fet d'imaginar la nostra espècie i el nostre entorn com un mosaic evolutiu de vida microscòpica podria evocar tota una imatgeria de dominació, dissolució i anihilació. Encara més pertorbadora és la conclusió filosòfica a la qual arribarem més endavant, segons la qual, el possible control cibernètic de la superfície de la Terra per part d'organismes microscòpics sense intel·ligència posa en dubte la suposada particularitat de la consciència humana intel·ligent.

Paradoxalment, a mesura que magnifiquem el microcosmos per tal de trobar els nostres orígens, podem apreciar amb més intensitat tant la victòria de l'individu com la seva condició insignificant. La unitat de vida més petita, la cèl·lula bacteriana, representa un monument, com a patró i com a procés sense rival a l'univers tal com el coneixem. Cada individu que creix, que duplica la seva mida i es reproduïx, és la història d'un gran èxit. Amb tot, així com l'èxit de l'individu se supedita en el de l'espècie, l'espècie s'engloba en la xarxa de la vida, un èxit d'una magnitud d'ordre encara superior.

És temptador, fins i tot per als científics, de deixar-se portar per històries d'èxit. Des dels deixebles de Darwin fins als enginyers genètics d'avui en dia,

la ciència ha popularitzat la visió que els humans són a l'esglaó superior de l'"escala" evolutiva de la Terra, i que amb la tecnologia hem sortit del marc de l'evolució. Alguns científics eminents i sofisticats, com ara Francis Crick al seu llibre "La vida mateixa", escriuen que la vida en general i la consciència humana en particular són tan miraculoses que no poden ser terrestres en absolut, sinó que es deuen haver originat en algun altre indret de l'univers¹³. N'hi ha d'altres que encara creuen que els humans som producte d'una "intel·ligència superior" paterna, els fills d'un patriarca diví.

Aquest llibre es va escriure per demostrar que aquestes visions menystenen la Terra i els camins de la natura. No hi ha cap prova que demostrï que els éssers humans siguem els supremes administradors de la vida a la Terra, ni les criatures menors d'una font extraterrestre. Però hi ha proves que demostrin que hem estat recombinats a partir de poderoses comunitats bacterianes amb una història de diversos milers de milions d'anys. Som part d'una xarxa travada que prové de la dominació bacteriana sobre la Terra. Els nostres poders intel·lectuals i tecnològics no ens pertanyen específicament a nosaltres, sinó a la vida. Com que els atributs útils rarament són descartats en l'evolució, és probable que els nostres poders derivats del microcosmos perdurin en el microcosmos. La intel·ligència i la tecnologia incubades per la humanitat són, de fet, propietat del microcosmos, i podrien sobreviure perfectament la nostra espècie en futures formes que es troben més enllà de les nostres limitades imaginacions.

13. Francis Crick. *Life Itself: Its Origins and Nature*. Nova York: Simon & Schuster, 1981.

○ Capítol 1

A PARTIR DEL COSMOS



○
Fa 4.000 milions d'anys. Eó hadeà.

Comença el microcosmos, a partir dels residus d'una explosió de supernova.

En el moment en què considerem la qüestió dels orígens a escala còsmica, la visió de nosaltres mateixos com una part, una minúscula part de l'univers, se'ns cau a sobre com una llosa. I és que, òbviament, els àtoms que formen els nostres cossos no van ser creats quan vam ser concebuts, sinó poc després del naixement de l'univers.

És un fet reconegut per l'astrofísica que la majoria de les estrelles del cel s'allunyen les unes de les altres a gran velocitat. Si ens imaginem quina seria la inversió d'aquesta tendència, apareix l'anomenada Gran Explosió (el *Big Bang*), la hipotètica alliberació de tota l'energia, matèria i antimatèria que existeix. Com qualsevol altra visió d'allò que Shakespeare va anomenar "la vaga retrospectiva i l'abisme del temps", hem d'evitar de confondre les nostres millors conjetures o les nostres extrapolacions relativament lineals de condicions presents en el passat amb la veritat literal. Lleugeres alteracions en les més petites suposicions poden portar cap a grans distorsions quan es magnifiquen al llarg de 15.000 milions d'anys, que és la suposada edat del nostre univers. No obstant això, aquestes extrapolacions ens concedeixen la millor imatge que podem tenir del cosmos que ha precedit l'evolució de la vida al microcosmos, així com també del microcosmos i de la seva expansió implacable.

Al llarg del primer milió d'anys d'expansió després de la Gran Explosió, l'univers es va refredar, segons les estimacions del físic Steven Weinberg, des d'uns 100.000 milions de graus Kelvin, fins a uns 3.000 graus Kelvin, el punt en el qual un electró i un protó podrien unir-se per crear hidrogen, l'element més simple i abundant a l'univers¹⁴. L'hidrogen va formar grans aglomeracions, anomenades supernoves, uns núvols enormes que es van anar contraient durant milers de milions d'anys des d'unes densitats còsmiques fins a unes densitats submicrocòsmiques. Els nuclis de les supernoves, sotmesos a la poderosa força de la gravetat, es van anar escalfant fins a desencadenar reaccions termonuclears i crear, a partir d'hidrogen i de diverses partícules subatòmiques disperses, tots els elements pesants de l'univers que coneixem actualment. Els nostres cossos són encara rics en hidrogen; contenen més àtoms d'aquest element que de cap altre tipus, principalment en l'aigua que forma el nostre organisme. Els nostres cossos d'hidrogen reflecteixen un univers d'hidrogen.

14. Steven Weinberg. *The First Three Minutes*. Nova York: Basic Books, 1977.

Taula 1. Escala de temps geològic* (en milions d'anys)

Inici de l'eó	Eons	Eres	Períodes	Èpoques
4.500	Hadeà			
3.900	Arqueà	Prefanerozoic		
2.500	Proterozoic			
580			Cambrià 580-500	
			Ordovicià 500-440	
		Paleozoic	Silurià 440-400	
		580-245	Devonià 400-345	
			Carbonífer 345-290	
			Permian 290-245	
	Fanerozoic		Triàsic 245-195	
		Mesozoic	Juràssic 195-138	
		245-66	Cretaci 138-66	
				Paleocè 66-54
		Cenozoic	Paleogen 66-26	Eocè 54-38
		66-0		Oligocè 38-26
				Miocè 26-7
				Pliocè 7-2
			Neogen 26-0	Pleistocè 2-0,1
				Holocè 0,1-actualitat

* No pròpiament a escala i simplificada

Els nous elements que s'havien creat es van expulsar cap a l'espai en forma del pols i el gas que componen les nebuloses galàctiques. Dins d'aquestes nebuloses, van néixer més estrelles i alguns cops els seus planetes-satèl·lit, en forma, una altra vegada, de partícules de pols i gas, que gravitaven, les unes al voltant de les altres, precipitant-se i concentrant-se fins a generar reaccions nuclears. Abans no es va ajuntar la matèria primera que amb el temps formaria la Terra a l'interior de la nebulosa solar d'un braç exterior de la Via Làctia, ja havien transcorregut de cinc a 15.000 milions d'anys, i havien ocorregut milers de milions d'esdeveniments que van donar lloc a les estrelles de l'univers.

A dins del núvol de gasos destinat a convertir-se en la Terra hi havia hidrogen, heli, carboni, nitrogen, oxigen, ferro, alumini, or, urani, sulfur, fòsfor i silici.

Els altres planetes del nostre sistema solar també van començar com a masses semblants de partícules de pols i gas. Però tot plegat s'hauria refredat i s'hauria quedat flotant sense cap finalitat com un residu en un espai sense vida, si no hagués estat per l'estrella immensa que es va formar al centre de la nebulosa, i que va atreure cap a la seva òrbita els petits cossos que estaven en procés d'enduriment, alhora que va entrar en una estable i duradora combustió que banyaria els seus satèl·lits amb contínues emanacions de llum, gas i energia.

En aquest punt, farà uns 4.600 milions d'anys, la massa de la Terra ja es trobava en unes circumstàncies que s'adiriien amb l'aparició de la vida. La primera és que es trobava a prop d'una font d'energia: el Sol. La segona és que, dels nou planetes principals que gravitaven al voltant del sol, la massa terrestre no n'era prou a prop perquè els seus elements s'evaporessin com gasos o es liqüessin com pedres foses. Tampoc es trobava prou lluny perquè els seus gasos es solidifiquessin en forma de gel, amoníac i metà, com es troben avui dia a Tità, la lluna més gran de Saturn. L'aigua es troba en forma líquida a la Terra, però a Mercuri s'ha evaporat tota l'espai enllà, i a Júpiter resta tota congelada. Finalment, la Terra era prou gran per conservar una atmosfera i permetre-hi la circulació cíclica i fluida dels elements; amb tot, no era prou gran perquè la gravetat mantingués una atmosfera massa densa que no deixés passar la llum del sol.

Quan el Sol va entrar en combustió, l'explosió va generar una onada expansiva de radiació que va escombrar el naixent sistema solar, i va remoure les atmosferes primitives de la Terra i d'altres planetes de l'interior del sistema. L'hidrogen, massa lleuger perquè la gravetat terrestre pogués conservar-lo, o bé va desprendre's l'espai endins o bé es va combinar amb d'altres elements, produint els ingredients necessaris per a la recepta de la vida. De l'hidrogen que es va quedar a l'atmosfera, una part es va combinar amb carboni per produir metà (CH_4), una altra part va formar aigua juntament amb l'oxigen (H_2O), en combinació amb el nitrogen també va produir amoníac (H_3N), i amb el sulfur va produir sulfur d'hidrogen (H_2S).

Aquests gasos, redistribuïts i recombinats en compostos de llargues cadenes, conformen pràcticament tots els components dels nostres cossos. Aquests components encara es conserven en forma gasosa a les atmosferes dels planetes més grans de les parts exteriors del sistema solar (Júpiter, Saturn, Urà i Neptú); o bé es troben en forma sòlida, glaçats, a les superfícies d'aquests planetes.

No obstant això, en la Terra, que era més petita, nova i que encara es trobava en fusió, alguns fenòmens més complexos que la gravetat van començar a implicar la intervenció d'aquests gasos en processos cíclics que els mantindrien on han estat fins el dia d'avui.

La Terra es va formar amb una fúria i una calor tals que durant aquells primers anys de l'eó hadeà (fa 4.500-3.900 milions d'anys), no hi havia cap part de la superfície terrestre en estat sòlid, ni oceans, ni llacs, ni tan sols la neu o l'aiguaneu dels hiverns septentrionals. El planeta era una pilota fosa de lava incandescent, que cremava amb l'escalfor de la desintegració de l'urani, el tori i el potassi radioactius del seu nucli. L'aigua de la Terra brollava a través de guèisers, propulsada des de l'interior del planeta en forma de vapor; era tan calenta que mai no va caure a la superfície en forma de pluja, sinó que va romandre com a vapor que no es podia condensar a les capes més altes de l'atmosfera. L'atmosfera era densa, i contenia cianur i formaldehid, verinosos l'un i l'altre. No hi havia oxigen respirable, ni organismes capaços de respirar-lo.

No ha sobreviscut cap roca terrestre provinent d'aquest infernal caos primigeni. Podem datar l'eó hadeà a partir de meteorits, i de les roques portades des de la Lluna, on manca l'aire, pels astronautes de l'Apol·lo. La Lluna va començar a refredar-se fa 4.600 milions d'anys, mentre la Terra encara estava en estat de fusió. Fa uns 3.900 milions d'anys, la superfície de la Terra s'hauria refredat i hauria format una escorça prima que se sostenia inestablement sobre l'estructura que tenia per sota, un mantell que encara estava en fusió. Aquesta escorça era perforada des de la part inferior i patia impactes des de la part superior. Hi havia erupcions volcàniques que abocaven lava a l'exterior a través d'esquerdes i fissures. També hi aterraven, amb violentíssims impactes, grans meteorits, alguns d'ells tan grans com muntanyes i amb poder explosiu superior al de tots els caps nuclears de les dues superpotències mundials. Formaven cràters en un terreny caòtic, aixecant extensos núvols de pols que eren rics en materials extraterrestres. Aquests núvols de pols foscos, escombrats per vents devastadors, s'arremolinaven al voltant del globus durant mesos i mesos abans no sedimentaven. Mentrestant, una enorme activitat de fricció causava la propagació de tempestes de trons i llamps.

Aleshores, fa 3.900 milions d'anys, va començar l'eó arqueà. Havia de durar més de 1.300 milions d'anys, i havia de veure-ho tot, des de l'origen de la vida

fins a la seva difusió en tapets microbians tous, virolats, verds i morats, i en dures cúpules de bacteris. Les immenses quantitats de roca que 3.000 milions d'anys més tard esdevindrien les masses de terra americana, africana i eurasiàtica, anaven flotant pel globus amb les seves desconegudes formes d'antics continents. Les formes continentals que coneixem avui en dia van ocupar les seves posicions actuals només durant el darrer 10% de la història del planeta.

L'escalfor i la radioactivitat, que encara bullien al nucli de la Terra, enviaven lava incandescent a través de les esquerdes d'una escorça que tot just s'estava refredant. Molta d'aquesta lava contenia ferro magnètic en estat fos, les molècules del qual, en solidificar-se i formar roques, es van orientar cap al pol magnètic de la Terra. Al principi dels anys seixanta, l'estudi d'aquestes orientacions magnètiques arcaïques va confirmar allò que s'havia observat anteriorment en la forma dels continents i dels seus corresponents estrats de roques i d'organismes fòssils dels seus extrems: les diverses "plaques" en les quals es divideix l'escorça terrestre es desplacen per sobre d'un mantell fos, separant-se d'una banda i topant amb les altres plaques per l'altra. Una placa continental es mou fins uns quants centímetres per any, de manera que pot desplaçar-se uns 1.600 quilòmetres cada milió d'anys. Fa dos-cents milions d'anys, per exemple, l'Índia estava enganxada a l'Antàrtida, lluny de la resta de l'Àsia. Movent-se a la deriva gairebé cinc centímetres per any, l'Índia es va moure 6.400 quilòmetres cap al nord, unint-se al continent asiàtic només fa uns 60 milions d'anys.

Les zones de juntura entre les plaques són llocs de violenta activitat. En els llocs on les plaques se separen i el magma hi xarbota fins a omplir les esquerdes que s'hi van eixamplant, s'hi crea terra o sòl oceànic nou. En els llocs on les plaques col·lideixen, hi són freqüents els terratrèmols i els volcans, i la Terra s'hi eleva per crear muntanyes. L'enfrontament lent, però violent, entre les plaques índica i asiàtica va empènyer l'Everest i l'Himàlaia al cim del món.

Els sismes i els terratrèmols al llarg de la falla de Sant Andreu, a Califòrnia, són avui un senyal de l'inexorable progrés de l'enorme placa del Pacífic, que es mou en direcció nord-oest al mateix temps que col·lideix contra la placa que es mou cap al nord, sobre la qual es troba el continent americà. Al nord d'Àfrica, el riu Zambeze (Moçambic) traça una línia divisòria en l'armadura de la Terra (la gran fossa tectònica africana) i està esguerdant el continent africà en dues

parts. Cap al sud, grans quantitats d'aigua omplen les esquerdes tan aviat com es formen, en esfondrar-se grans volums de roques. Cap al nord, a Àfar (Etiòpia), l'aigua encara no ens priva la vista. Roques foses regalimen de dins el mantell a la superfície, i se solidifiquen en forma de "coixins basàltics", que acabaran formant el sòl d'un nou oceà panafricà. El sòl d'aquest futur oceà està encara sec en la seva major part. I la vista panoràmica de la vall d'Àfar és la mateixa que podríem veure si l'aigua de l'oceà Atlàntic fos drenada i poguéssim contemplar la nova formació de sòl marí al llarg de la fossa tectònica.

La falla de Sant Andreu, la fossa tectònica africana, la dorsal atlàntica central, la serralada pacífica est i les illes volcàniques de Hawaii són actualment rars indrets d'activitat geològica en un planeta que, en la seva major part, viu plàcidament. Però durant l'eó arqueà, aquestes activitats tectòniques van perforar la superfície de la Terra. Pels orificis i les junctures de l'escorça s'expulsaven enormes quantitats de vapor. La Terra estava tota coberta d'una boira fosca produïda per gasos de carboni i fums sulfurosos. Pluges de cometes glaçats i de meteorits carbonats bombardejaven el planeta, s'inflamaven en creuar l'atmosfera, queien a la seva superfície dèbil i inestable, i esbocinaven l'escorça encara més. Amb aquests cossos de l'espai, també van arribar carboni i aigua en quantitats suficients per afegir-se a les reserves de la Terra, i incrementar el que més endavant serien les matèries primeres de la vida.

Mentre la Terra seguia refredant-se, els núvols de vapor que omplien l'atmosfera van poder condensar-se finalment. Van caure pluges torrencials de manera continuada potser durant 100.000 anys, les quals van crear uns oceans calents i poc profunds. Els marges de les plaques submergides, rics en substàncies químiques i en energia, van anar alliberant gradualment en el mar gasos rics en hidrogen. La lava incandescent de les fosses tectòniques i els volcans, en trobar-se amb l'aigua, s'anava evaporant, es condensava i tornava a caure de nou en forma de pluja. Les aigües van començar a erosionar el paisatge rocós, suavitzant les lesions i les ferides produïdes per les erupcions constants dels volcans i pels poderosos impactes dels meteorits. Les aigües van arrodonir les muntanyes a mesura que s'anaven creant, arrossegaven sals i minerals cap a l'interior dels oceans i els llacs. Mentrestant, tenia lloc un esdeveniment que algunes vegades s'ha anomenat la Gran Erupció (*Big Belch*); l'activitat tectònica va alliberar gasos atrapats a l'interior de la Terra per formar una atmosfera nova de vapor d'ai-

gua, nitrogen, argó, neó i diòxid de carboni. En aquestes alçades, la majoria de l'amoníac, del metà i dels altres gasos rics en hidrogen de l'atmosfera primigènia s'havien perdut en l'espai. Queien llamps. El Sol seguia irradiant calor i llum ultraviolada cap a la Terra, la qual anava guanyant gruix mentre el planeta girava sobre si mateix a tota velocitat, en cicles de cinc hores de dia, i cinc hores de nit. La Lluna també s'havia condensat des de la nebulosa solar. Com que un 15% de la Lluna és material d'origen terrestre, el millor model que tenim proposa que la Lluna va sorgir quan un asteroide va impactar contra la superfície terrestre, i hi va entrar en òrbita perquè no va poder escapar completament de la gravetat de la Terra. El nostre fidel satèl·lit natural, força gran per a un planeta interior de no-res com la Terra, va atreure des del començament, de manera rítmica, grans masses d'aigua, creant les marees.

És en aquest període de l'eó arqueà, fa d'uns 3.900 a 2.500 milions d'anys, que trobem els primers indicis de vida. I