

ELS MATERIALS PRIMIGENIS I L'EVOLUCIÓ PRE-BIÒTICA

per

ALFRED GINER-SOROLLA

Universitat de South Florida, College of Medicine, Departament
de Farmacologia, Tampa, Florida, EUA

*Al principi el món era no-res; el cel no hi era, ni la
terra, ni l'espai. Perquè no hi era, va pensar de sí mateix:
seré, i va emetre foc...*

(D'un papir egipci)

RESUM

Hom descriu els diversos estadis de l'evolució dels materials conduents a l'origen de la vida a la Terra, des del «gran esclat» fins a l'aparició dels primers microorganismes. Com a límit superior del procés de formació de la vida hom assenyalava l'ambient de la Terra primitiva; com a límit inferior del període de biopoesi hom troba la presència de microfòssils en el Pre-cambrià. Hom exposa les diverses aproximacions experimentals que tracten de duplicar els processos biopoètics fonamentant-se en les diferents concepcions sobre la composició i les condicions atmosfèriques de la Terra primitiva. Hi és discutida la possibilitat que la vida a la Terra fos originada pel procés de la panspèrmia còsmica, així com l'existència de vida en altres sistemes solars.

SUMMARY

The evolution of matter from the beginning of the univers (big bang) to the origin of life on Earth is briefly described. The primitive Earth environment is viewed as the upper limit of the biopoetic process, which has as the lower boundary the presence of Precambrian microfossils. The diverse hypotheses as to the composition of the Earth's atmosphere has led to different approaches regarding experimental models in the simulation of biopoesis. The possibility of cosmic panspermia and the existence of life in other worlds, is concisely discussed.

INTRODUCCIÓ

L'origen de l'univers i la constitució de la matèria de la qual sorgí la vida, és, sens dubte, un dels temes més apassionants i fonamentals de la ciència i que transcendeix els seus límits, pel fet que clàssicament aquest coneixement ha format part tant de la metafísica, com de doctrines religioses i mitologies. Dins els models cosmològics de l'actualitat, l'estudi de la constitució de la matèria als moments inicials de la creació, no tan sols té rellevància per a desxifrar el curs evolutiu de l'univers, a gran escala, sinó per l'estreta relació que presenta amb la constitució de les partícules subatòmiques de la matèria present.

Si hom dona un cop d'ull al fons i desenvolupament històric que han conduït al present coneixement en ciències físiques, pot observar els estadis que esglonadament constitueixen l'anomenada revolució científica. En primer lloc, l'enunciació de la teoria heliocèntrica per Copèrnic i la demostració experimental per Galileo d'aquesta teoria, així com la descoberta de la immensitat de la Via Làctia i la immutabilitat de l'àtom, va anar seguida en un segon estadi per la formulació newtoniana de la dinàmica dels cossos celestials, trobada per paral·lelisme amb la dels cossos a la Terra. Un tercer esglaió el van emprendre Kant i Laplace en postular per primera vegada una teoria científica de la formació del sistema solar. Com a quart estadi del desenvolupament de les ciències físiques, figura l'esfondrament de les creences màgiques de la constitució de la matèria, duta a terme per Lavoisier, seguit

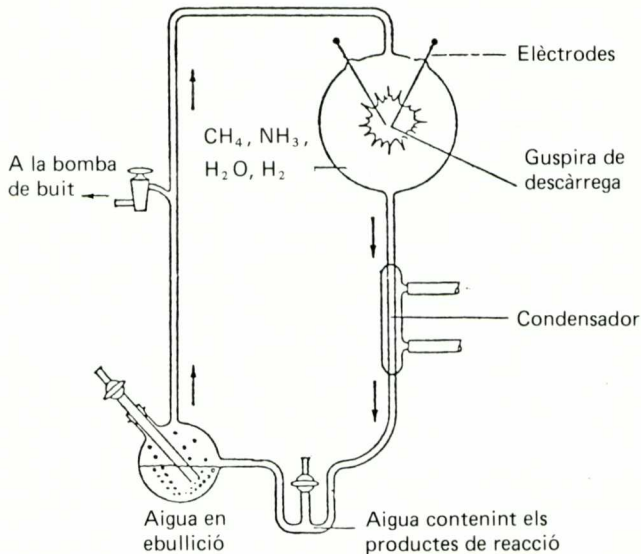


Figura 1. Esquema de l'aparell emprat per S. Miller per a la primera síntesi pre-biòtica.²⁰

per la introducció de la teoria atòmica per Dalton, tancant així un parèntesi de dos mil·lenis d'oblit des de Demòcrit i Lucreci, primers enunciadors de l'existència dels àtoms.

Si l'aplicació del telescopi per a l'observació de l'univers per Galileo eixamplà els límits de l'univers en una forma que no era concebuda per la teoria copernicana, (la qual, si bé postulava l'heliocentrisme, era plagada de l'esperit medieval d'un món tancat), aquesta observació experimental que demostra l'existència de l'infinit mitjançant un instrument òptic fou complementada tres segles més tard per l'aplicació d'un altre instrument, l'espectroscopi, per Fraunhofer, que permeté d'analitzar l'emissió lluminosa dels estels i del Sol, tot demostrant la unitat de composició elemental de l'univers. La sistematització dels elements químics per Mendeleiev confirmava la teoria atòmica de Dalton i apuntava vers el desenvolupament evolutiu dels elements a partir de l'hidrogen com a àtom primari. Les troballes de la física moderna, així com de l'astronomia, han anat confirmant i refinant aquests coneixements dels segles anteriors.

ORIGEN I EVOLUCIÓ DE LA MATÈRIA

Constitueix una característica ben peculiar en allò que pertany a la composició de l'univers i dins la unitat de la matèria arreu d'ell, el fet que hom trobi que la major proporció dels elements sigui l'hidrogen, en percentatges que varien segons diferents càlculs, del $\approx 80 - 90 \%$, i l'heli, $10 - 20 \%$; mentre que els elements més pesants tan sols $\leq 1 \%$. Aquesta prevalença d'hidrogen i d'heli, els dos elements més lleugers, a l'univers suggereix la plausibilitat dels models cosmològics actuals, tant els basats en l'explosió de l'àtom primordial com el de l'univers estacionari. Cal tan sols considerar el nostre sistema solar per a comprovar aquesta afirmació; en efecte, tant el Sol com els grans planetes jovians són constituïts majoritàriament per hidrogen i heli, respectivament el combustible i com aquell qui diu les cendres de la transformació energètica que ocorre en tots els estels; en el cas dels planetes jovians, hom els pot considerar sols avortats. Aquesta abundància d'hidrogen i heli ha estat explicada per Alan Guth i altres per l'elevadíssima temperatura que existí a l'inici de l'univers; és el començament de la física, el moment o temps Planck que pot definir l'estat de l'univers en el 10^{-43} segon des de la creació. Hom no pot fins ara, definir quines circumstàncies ni quin estat de la matèria eren presents abans d'aquest moment infinitesimalment reduït. El model proposat per Alan Guth i altres, és el concepte de l'univers inflacionari «que intenta construir un univers a partir de *quasi* no-res», resultat tot d'«un accident, de l'«ultimate free lunch»». L'origen s'explicaria per una «fluctuació quàntica del buit»; concepte que contrasta amb segles de tradició científica, plasmat en el primer principi de la termodinàmica i que fou iniciat pel filòsof grec Parmènides, segons el qual: «res no pot ésser creat de

Taula I. Inici i evolució de l'univers

<i>Temps</i>	<i>Temperatura</i> °K	<i>Diàmetre</i> <i>Univers</i>	<i>Esdeveniment</i>	<i>Època</i>
10 ⁻⁴³ s.	10 ³²	10 ⁻²⁸ cm	Inici de l'expansió universal	Començament de la física
10 ⁻³⁵ s.	10 ²⁸	10 ⁻²⁴ cm → ≈ 20 cm	Formació de quarks i electrons i llurs imatges de mirall: matèria i antimatèria	Univers inflacionari
10 ⁻³² s.	10 ²⁷	100 m	Matèria, antimatèria i radiació bombollen en un brou opac	Fi del període inflacionari; univers quasi homogeni.
10 ⁻⁶ s.	10 ¹³	5,8 × 10 ⁹ km	Quarks es combinen amb protons i neutrons; matèria i antimatèria s'anihilen mútuament; l'excés lleuger de matèria comprèn tota l'existent avui a l'univers	
3 min.	10 ⁹	10 ¹⁶ km	Protons i neutrons es fusionen en nuclis atòmics; electrons són massa energètics per a ésser lligats i formar àtoms	
10 ⁵ anys	3 × 10 ³	10 ¹⁹ km	Electrons i nuclis es combinen formant àtoms; la radiació se separa de la matèria i la llum pot viatjar per l'espai	
10 ⁹ anys	15	10 ²² km	Formació de quasars; l'univers comença a aparèixer com actualment	

(Adaptat de J. Silk, p. 66 i R. Gore, p. 740) (Ref. 1, 2).

no-res», concordant, però, amb mitologies de l'Orient Mitjà; un exemple d'aquesta creença és reflectit en la cita que encapçala aquest article. Una sinopsi que resumeix els diferents estadis que segons el model inflacionari ha experimentat l'univers des de la seva creació, és a la Taula I.^{1, 2}

Conceptes inimaginables respecte a l'univers inflacionari han estat expressats per Weinberg:³ «Al principi fou una enorme explosió; no pas una explosió com aquestes que coneixem a la Terra, que s'inicien en un centre definit i s'escampen tot envoltant més i més espai circumdant, sinó una explosió que ocorregué simultàniament *pertot arreu*, omplint tot l'espai des del començament, amb cada partícula apressant-se per a separar-se i fugir de la contigua». O en paraules de l'astrònom Mallove: «Som realment el pro-

ducte d'una nihilitat («nothingness») que s'ha elaborat ell mateix», quan tractava d'explicar l'essència de la teoria de l'univers inflacionari.⁴

ELS ELEMENTS BIOGÈNICS

Si hom considera els elements des del punt de vista de llur abundància, llevat de l'hidrogen, l'heli i el neó, hom troba que el carboni és el més prevalent a l'univers. Aquest fenomen fou analitzat per Joan Oró el 1963; cal mencionar en les seves paraules aquesta observació fonamental:⁵

«...Bé que la composició química de la Terra, la Lluna, Mart, Venus, ha estat determinada (els tres últims per proves espacials) com formats per sis elements predominants: O, Si, Al, Fe, Ca, Mg; no gensmenys, tant als planetes jovians com als estels, incloent-hi el Sol, la composició és l'esmentada per a l'univers en conjunt, H, He, Ne, i carboni... Així, els elements més abundants, a l'excepció dels gasos nobles (He, Ne), l'hidrogen, oxigen, carboni i nitrogen són els que constitueixen en forma majoritària tots els éssers vius, la matèria orgànica...» I continua: «...Ens trobem, doncs, amb una aparent paradoxa: la matèria viva és una mostra més representativa de la composició elemental de l'univers, que la matèria inerta de la Terra i altres planetes petits del sistema solar.»

Tot seguit explica Oró aquesta paradoxa amb la suggestiva comparació:

«...del sistema solar com un cromatograma gegantí (gas-sòlid), en el qual la part central del sistema, ocupada pels planetes petits i asteroides, fou probablement minvada dels elements químics lleugers per la calor radiant i per l'hidrogen i l'heli actuant com a gasos de transport dimanant contínuament del Sol primitiu. Així, els elements lleugers foren desplaçats cap a la regió externa del sistema solar, on es troben els grans planetes jovians i els cometes. Per tant, com que la massa dels planetes jovians és més del 99% de la massa planetària total del sistema solar, i com que aquests planetes són fets d'heli i d'elements reactius lleugers (H, C, N, O, etc.), hom pot concloure que la química d'aquests elements, que és en part química orgànica, és la química predominant del sistema planetari solar. Això vol dir, doncs, que els planetes que formen part de la petita zona interna del sistema solar, són en realitat l'anomalia excepcional que ens confirma la regla...»

Aquestes observacions foren plasmades per Oró en una frase ben punyent:

«L'univers és essencialment orgànic.»

I aquesta asserció és confirmada, per altres raonaments i troballes, i principalment per la determinació per Aller de la major estabilitat de l'element carboni en relació amb el beril·lí en la nucleosíntesi; aquest element

Taula II. Principals espècies químiques observades a l'espai interstel·lar

<i>Espècie</i>	<i>Símbol</i>	<i>Espècie</i>	<i>Símbol</i>
Cianogen	(CN) ₂	Monòxid de silici	SiO
Hidrogen (atòmic)	H	Cianur de metil	CH ₃ CN
Radical hidroxil	OH	Àcid isociànic	HNCO
Heli	He	Acetaldehid	CH ₃ CHO
Carboni monoatòmic	C	Tioformaldehid	CH ₂ S
Amoníac	NH ₃	Sulfur d'hidrogen	SH ₂
Aigua	H ₂ O	Metanimina	H ₂ CNH
Formaldehid	CH ₂ O	Metilamina	CH ₃ NH ₂
Monòxid de carboni	CO	Etanol	CH ₃ CH ₂ OH
Cianur d'hidrogen	HCN	Diòxid de sofre	SO ₂
Cianoacetilè	HC ₃ N	Cianamida	NH ₂ CN
Metanol	CH ₃ O	Acetilè	C ₂ H ₂
Àcid fòrmic	HCOOH	Àcid isotiocianic	HNCS
Formamida	HCONH	Cianopentaacetilè	HC ₁₁ N
Monosulfur de carboni	CS	Hidròxid sòdic	NaOH

(6) (Oró, 1986, p. 560). En aquestes determinacions, iniciades el 1937, ha estat emprada espectroscòpia de microones o ultraviolada; dades fins el 1982. Recentment han estat descobertes molècules cícliques: C₂Si i C₃H.

es descompon en partícules α mentre que el carboni recentment format a temperatures de 10⁸ graus Kelvin ràpidament passa a un estat molt estable, probablement a causa de l'elevada simetria interna del seu nucli, i així va acumulant-se a l'interior dels estels on, juntament amb el nitrogen, actua com a catalitzador de les reaccions termonuclears de conversió de l'hidrogen en heli.^{6, 7}

La teoria de Joan Oró sobre la ubiqua presència del carboni al cosmos, ha estat confirmada a més, per l'anàlisi de meteorits (els meteorits carbonacis), dels cometes i de l'espai interstel·lar i de la galàxia. Les exploracions de l'espai intergal·làctic mitjançant l'observació i anàlisi òptica, espectral, per radiotelescopis, han revelat les dades més sorprenents pel que fa a la composició de l'espai interstel·lar, que vénen a confirmar la troballa esmentada, i tan fonamental al segle passat, de Fraunhofer sobre la unitat de la matèria, és a dir dels elements arreu de l'univers. Les anàlisis de l'espai intergal·làctic han revelat la presència d'espècies químiques totes elles conegudes, com podem observar a la Taula II, la majoria de les quals són compostos orgànics, i uns quants d'inorgànics entre elles, i sorprenentment, alguns tan reactius com ara l'hidròxid sòdic i el diòxid de sofre, aquest últim component a la Terra de la contaminació de zones urbanes. Que a l'univers es trobi etanol sense que calgui passar pel procés de fermentació de la glucosa és un fet que despertà comentaris; la seva presència tan sols es podria explicar si hom trobés etilè, del qual podria derivar per hidratació; no havent estat detectat aquest gas a l'espai, el seu origen roman una incògnita. Cal notar la presència de formaldehid, compost clau per a la síntesi pre-biòtica i al qual han estat atribuïdes propietats mutagèniques i carcinogèniques; precursors de

Taula III. Distribució del carboni en el meteorit Murchison CM2

<i>Espècie química</i>	<i>Abundància</i>
Fase insoluble carbonàcia	1.3-1.8 %
Carbonat i CO ₂	0.1-0.5 %
Hidrocarburs	
alifàtics	12-35 ppm
aromàtics	15-28 ppm
Àcids	
monocarboxílics (C ₂ -C ₈)	~ 170 ppm
dicarboxílics (C ₂ -C ₉)	+, no mesurat
hidroxicarboxílics (C ₂ -C ₅)	~ 6 ppm
Aminoàcids	10-20 ppm
Alcohols (C ₁ -C ₄)	~ 6 ppm
Aldehids (C ₂ -C ₄)	~ 6 ppm
Cetones (C ₃ -C ₅)	~ 10 ppm
Urees	~ 20 ppm
Amines (C ₁ -C ₄)	~ 2 ppm
Heterocicles nitrogenats	
Pirimidines i quinolines	0.04-0.40 ppm
Purines	~ 1 ppm
Pirimidines	~ 0.05 ppm
Polipirrols	≪ 1 ppm

(De J.A. Wood i S. Chang [1985, pàg. 56] [9]).⁹

carcinògens en la llista són les amines. La presència d'òxid de silici, formaldehid i amoníac en els grànuls interstel·lars, així com la presumpta detecció per l'astrònom Hoyle⁸ de cel·lulosa, lípids, proteïnes i fins i tot bacteris, algues i virus per l'espai intergal·làctic (calcula que hi ha 10⁴⁰ grams d'aquests microorganismes per la Via Làctia), indicaria que la vida pot sorgir segons Hoyle, en condicions tan adverses com són les de l'espai interstel·lar, en un tipus de panspèrmia veritablement còsmica.

Han estat també sorprenents els resultats de les anàlisis de meteorits carbonacis, com mostrem a la Taula III;⁹ essent els meteorits vestigis del gran conjunt de la nèbula solar, de la matriu de la qual es varen formar tots els cossos del sistema solar, la presència de composts orgànics i biogènics indica llur origen remot i llur presència ubiqua. Si bé aminoàcids, aldehids i urees constitueixen uns productes de la síntesi prebiòtica, llur estructura simple i llur troballa resulten ben plausibles, però el que hagin estat també detectats compostos cíclics biogènics, més complexos, les purines, pirimidines i pirrols, fa considerar si l'origen d'aquests materials és degut a una síntesi *à la Fischer-Tropsch* per les condicions de temperatura i pressió i existència de metalls que actuarien com a catalitzadors; ¿o bé ens trobem amb la possibilitat que aquests composts cíclics provinquin d'un procés fallit de biopoesi, d'uns àcids nucleics o pigments pirròlics procedents d'altres mons on la vida s'hagués desenvolupat d'una forma similar a la que tenim a la Terra? Com

Taula IV. Espècies químiques observades en espectres cometaris

<i>Orgànic^a</i>	<i>Inorgànic^b</i>	<i>Metalls^c</i>	<i>Ions^d</i>	<i>Pols^e</i>
C	H	Na	C ⁺	Silicats
C ₂	NH	K	CO ⁺	
C ₃	NH ₂	Ca	CO ₂ ⁺	
CH	O	V	CH ⁺	
CN	H ₂ O	Mn	H ₂ O ⁺	
CO	S	Fe	OH ⁺	
CS		Co	Ca ⁺	
HCN		Ni	N ₂ ⁺	
CH ₃ CN		Cu	CN ⁺	

^{a, b} Observats en els nuclis de cometes com a línies o bandes d'emissió visible o ultraviolada; excepte HCN, CH₃CN i H₂O, que són observats per radiofreqüència. ^c Detectats com a línies en cometes passant ben a prop del Sol (excepte Na que pot ésser observat en molts cometes, àdhuc fora d'una unitat astronòmica). ^d Detectat com a línies visibles o ultraviolades, o bandes a l'inici del plasma de la cua. ^e Observat com a emissió infraroja a l'inici de la cua amb pols. (De J.A. Wood i S. Chang, 1985, p. 53) (Ref. 7).

succeeix sovint, per cada resposta surten més qüestions, com ja fou expressat per Bernard Shaw:

«Quin és el destí de la ciència i dels científics! Per cada problema que resolen, tot seguit sorgeixen o s'inventen mil qüestions noves a respondre».

Les anàlisis dutes a terme recentment, per vehicles espacials, del cometa Halley, han confirmat les dades obtingudes per l'observació astronòmica de cometes anteriors. Hom pot observar en la Taula IV una llista de les diferents espècies químiques detectades per diverses eines analítiques. Cal destacar la presència de les espècies potencialment biogèniques com ara el CN, CO, CS, HCN, CH₃CN, NH₂ i H₂O i els metalls V, Mn, Fe com a catalitzadors de reaccions biogèniques i com a nuclis centrals de pigments biològics. D'aquests resultats deduí Oró la hipòtesi que els cometes podrien haver contribuït a l'origen de la vida a la Terra.¹⁰ Per càlculs sobre la freqüència amb què els cometes han xocat amb la Terra, tot dipositant-hi materials gasosos i sòlids —especialment durant l'època pre-biòtica—, devien haver afegit uns 10²² grams de materials orgànics a la crosta terraquïa, fent que una bona proporció del carboni existent a la Terra sigui d'origen cometari. No es tractaria d'un aspecte de panspèrmia còsmica el fet d'haver succeït aquest afegiment de materials de l'espai exterior, ja que no han estat detectats en meteorits vestigis que poguessin denotar la presència de microorganismes; les condicions per a l'origen de la vida no serien les més adequades com es presenten en l'ambient cometari. Es tractaria, doncs, de l'acreciment de materials orgànics d'estructura suficientment complexa que proveïrien com un avenç, un impuls que acceleraria la formació de materials biogènics més complexos a la Terra ajudant així, potser, en forma decisiva el procés biopoètic. Hom ha fet estimacions del nombre possible de cometes existents entorn del Sol,

l'anomenat «anell d'Oort», situat molt enllà de l'òrbita de Plutó, que pot ésser a 1 any de llum distant del Sol, en el qual se situarien uns 10⁹ cometes que, ocasionalment atrets per la força gravitatòria del Sol, apareixen pel nostre sistema. És ben curiós que els cometes que han estat considerats senyals de mal averany, podrien molt bé figurar com uns dels factors essencials per a l'origen de la vida al nostre planeta. La possibilitat que molècules interstel·lars —i en general tot compost existent o provinent de l'espai exterior— pugui donar lloc a materials biogènics, ha estat analitzada per Oró;⁷ la relació entre algunes d'aquestes molècules i els productes potencials o propietats de reacció es troba resumida en la Taula V.

Hom pot concloure afirmant que tant l'abundància com la gran diversitat de compostos orgànics arreu de l'univers té òbviament ressonàncies pel que fa a la possibilitat d'un origen de materials biogènics, i d'aquí la primera cèl·lula i tota l'evolució biològica. Sembla com si la vida fos immanent a la presència de la matèria (o constituint un dels atributs d'ella) d'una forma similar com ho serien també la gravitació, el magnetisme, l'espai i el temps.

EL PROCÉS DE LA BIOPOESI I ELS SEUS LÍMITS

Tots els éssers vius són compostos essencialment de quatre tipus de macromolècules: àcids nucleics, proteïnes, polisacàrids i lípids. Els àcids nucleics són implicats en la transmissió de la informació genètica, i existeixen en tots els organismes i en la formació i seqüència de les proteïnes. El DNA (àcid desoxiribonucleic) és en tots els organismes, excepte alguns virus. El RNA (àcid ribonucleic) forma part com a molècula d'informació en la síntesi de proteïnes; alguns dels RNA, però, no contenen informació genètica (RNA ribosòmic i RNA de transferència). El DNA és format per quatre àcids des-

Taula V. Molècules interstel·lars i llurs possibles materials biogènics (7)

<i>Molècules interstel·lars</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Monòmers biogènics i propietats</i>
Hidrogen	H ₂	Agent reductor; protonació
Aigua	H ₂ O	Dissolvent universal, hidroxilació
Amoniàc	NH ₃	Base catalítica, aminació
Monòxid de carboni	CO	Hidrocarburs i àcids grassos
Formaldehid	CH ₂ O	Monosacàrids (ribosa) i glicerina
Acetaldehid	CH ₃ CHO	Desoxipentoses (desoxiribosa)
Aldehids (de HCN)	R-CHO	Aminoàcids
Tioformaldehid	CH ₂ S	Cisteïna i metionina
Cianur d'hidrogen	H ₂ CN	Purines (adenina, guanina); aminoàcids
Cianacetilè	HC ₂ N	Pirimidines (citosina, uracil, timina)
Cianamida (imidazols)	H ₂ NCN	Formació d'oligòmers (pèptids, nucleòtids, lípids)
Fosfamina (Júpiter); fosfats (meteorits)	PH ₃	Formació de derivats de fosfats

oxiribonucleics que són els 5'-fosfats del carbohidrat desoxiribosa, lligats covalentment a la posició N-9 d'una purina o la N-3 d'una pirimidina. Les purines són l'adenina i la guanina, les pirimidines, la timina i la citosina. El RNA conté uracil en comptes de timina, mentre que el RNA de transferència mostra una diversitat de bases heterocícliques hipermodificades.

Les proteïnes són els components majoritaris dels animals i en menor proporció de les plantes, així com dels enzims, catalitzadors i reguladors de les funcions cel·lulars.

Tant els polisacàrids com els lípids actuen com a fonts d'energia cel·lular i també formen part de l'estructura dels éssers vius.

El fet que tots els organismes presentin les mateixes substàncies bàsiques, aminoàcids, purines, pirimidines i catalitzadors, indica la unitat dels materials biogènics i de llur origen. Més important encara és el fenomen que la majoria de les seqüències estructurals de les macromolècules i per damunt de tot, els patrons de les reaccions biològiques, (la fermentació anaeròbica, el cicle de Krebs, la biosíntesi dels àcids nucleics, llur transcripció, la síntesi de carbohidrats i lípids) són idèntiques en tots els éssers vius estudiats fins ara. Aquest fet suggereix un origen comú, tal com és expressat en la universalitat del codi genètic. En tot cas, la qüestió que sorgeix d'aquest fet és la del seu origen, la qual cosa ens duu a considerar les diferents possibilitats de la biopoesi, l'origen de la vida. En el cas particular de l'evolució química, el procés de biopoesi, és a dir, l'origen de la primera cèl·lula, es realitzà en un moment determinat i de forma única; d'haver sorgit la vida a diversos llocs, no es presentaria la unitat en composició i funcions dels éssers vius, manifestada en la universalitat esmentada del codi genètic.

De les diverses concepcions sobre l'origen de la vida (Taula VI)¹¹ —n'excloem la doctrina creacionista per raons ben òbvies— la generació espontània en la seva forma clàssica fou completament enfonsada pels experiments de Pasteur. La panspèrmia còsmica tingué el seu precedent clàssic en el filòsof eleàtic Anaxàgores, que introduí l'expressió «panspèrmia» indicant llavors pertot arreu, gèrmens que suraven per l'aire i eren arrossegats per la pluja i en dipositar-se en la terra produïen tota mena d'éssers vius. Una versió més moderna fou proposada per Arrhenius al segle passat, en la qual sostenia l'existència de gèrmens per tot l'univers procedents de planetes, que s'escapaven empesos per la radiació lluminosa i que, dipositats en altres planetes, degueren propagar la vida per tot l'univers. Hi ha nombrosos factors que s'oposen a la plausibilitat d'aquesta teoria: l'enorme distància entre estels, la reduïda probabilitat d'existència d'altres planetes amb vida; les extremes temperatures a què serien exposats els gèrmens, tant durant llur viatge per l'espai, com a l'entrada en una atmosfera oxidant a elevada velocitat. Hi ha qui suposa que els materials primigenis que originaren la vida a la Terra foren transportats per OVNIS; això depassa els límits de la ciència i entra en el de la ficció. Encara que l'home ja ha exercit el rol d'OVNI amb el seu trepitjar de la Lluna i les proves interplanetàries, donat l'ambient inhòspit

Taula VI. Creences i teories sobre l'origen de la vida (biopoesi)

<i>Creença o hipòtesi</i>	<i>Nombre de biopoesis</i>	<i>Característiques</i>	<i>Fons històric o cosmològic</i>
Creacionisme	1	Formació dels éssers vius per intervenció sobrenatural	Mitologies, religions (4.000-600 a.C.)
Generació espontània	∞	La vida, procés espontani i màgic, generalment a partir de la matèria en descomposició	Doctrines clàssiques i tesis modernes (600 a.C.-1865)
Panspèrmia còsmica	0	Vida com a immanent a la matèria, fenomen etern i universal. Transferència contínua d'espores arreu de l'univers (Anaxàgores, 490 a.C., Richter, Pasteur, Arrhenius, Liebig, Orgel, Crick, Hoyle, s. XIX-XX)	Univers estable i etern; producció contínua d'hidrogen (Hoyle, 1950)
Evolució química	1	La vida originada a partir de la matèria inerta, per un procés inevitable en estadis a la Terra primitiva. (Darwin, Haldane, Oparin, Urey, Miller, Oró, s. XIX i XX)	Àtom primordial i expansió de l'univers (De Sitter, Lemaitre, 1925; Gamow, 1948), Univers inflacionari (Guth, Hawking, Starobinski, Gott (1978-...))

(Adaptat de N.W. Pirie)¹¹

tant de la Lluna com de Mart i Venus, no existeix la possibilitat que qualsevol germen que hi hagués pogut quedar iniciï el procés de biopoesi en aquests planetes.

Més recentment ha estat descrit un nou tipus de panspèrmia, l'anomenada «panspèrmia dirigida» de Crick i Orgel,¹² autors que proposen la construcció i llançament d'un vehicle espacial carregat de gèrmens de tota mena de la Terra i enviar-los a altres sistemes solars, amb l'esperança d'ensopegar amb algun cos planetari on pugui iniciar un procés similar al que devia originar la vida a la Terra. Cal notar les esmentades observacions i teoria de Hoyle⁸ sobre la presència a l'espai intergal·làctic de molècules biogèniques i microorganismes de tota mena; a alguns d'ells fins i tot els atribueix l'aparició periòdica d'epidèmies en penetrar a l'atmosfera de la Terra.

Abans d'entrar en la descripció de l'evolució química, cal considerar el plantejament del problema de l'origen de la vida a la Terra; per a això seran considerats els límits cronològics entre els quals es troba compresa la biopoesi: el superior de la Terra primitiva i l'inferior del Pre-cambrià.

EL LÍMIT SUPERIOR DE LA BIOPOESI: L'AMBIENT DE LA TERRA PRIMITIVA

La Terra primitiva, originada fa uns 4.500 milions d'anys, consistia inicialment en un conjunt d'agregats, de materials fosos per la descàrrega d'energia gravitatòria, dels elements radioactius en decaïment, i experimentava els efectes de la radiació d'un Sol més jove que entrava en la seqüència principal del diagrama Hertzsprung-Russell. Al principi no hi havia cap atmosfera a la Terra; el seu cor era metàl·lic i fos amb un mantell de silicats i una crosta amb una varietat gran de carburs i hidrurs metàl·lics, d'òxids, carbonats i silicats. El tipus de gasos que componien l'atmosfera primitiva terràquia és un dels temes més discutits, como ho és també la composició i evolució de la crosta del planeta; hom troba, però, una unanimitat a atribuir un origen volcànic a l'existència de gasos a l'ambient primitiu de la Terra. Entre els primers arguments a favor d'aquest origen figuren els d'Oparin¹³ i Urey,¹⁴ que proposaren una atmosfera composta majorment de metà, amoníac, aigua i hidrogen. Fou Urey qui, adonant-se de la prevalença d'hidrogen a l'univers i de la detecció dels compostos metà i hidrogen en els planetes jovians, deduí que tota possibilitat de reconstruir les síntesis prebiòtiques en l'actualitat s'hauria de basar en aquestes premisses de la composició, a més de certes condicions energètiques que hom suposa que existien als oceans primitius o als microambients que podrien iniciar el procés pre-biòtic (llacs, tolls). Altres autors com ara Calvin¹⁵ proposaven una atmosfera amb elevada concentració d'anhídrid carbònic i contenint oxigen. Un punt de vista oposat fou mantingut per Abelson basant-se en el fet que si el percentatge de metà en l'atmosfera primitiva fos de $\geq 1\%$ com proposaven Urey i Oparin (i com més recentment ha estat avançat per Gold amb la teoria de grans dipòsits d'aquest gas a l'interior del planeta), aleshores haurien hagut de formar-se grans quantitats de sediments de carbó, molt més grans que els que es troben en el Cambrià i el Mesozoic. Fa notar Abelson que els dipòsits de carbó i petroli foren originats a partir d'èpoques recents, del Devonian al Juràssic amb un màxim durant el Carbonífer i així dedueix que els gasos de l'atmosfera primitiva devien contenir, monòxid i diòxid de carboni, nitrogen i hidrogen per a concordar amb les dades geològiques esmentades.¹⁶

Els gasos de la Terra primitiva, si bé majorment reductors, devien contenir una minsa proporció d'oxigen, segons es desprèn de recents troballes geològiques; una imatge de l'evolució de l'atmosfera que sembla ésser la més plausible ha estat exposada per Hart, en la qual es dona una gran abundància de metà que sorgeix per emissions volcàniques, a partir del moment de la formació de la Terra (4.5×10^9 anys) i que va augmentant fins a arribar a un màxim fa $3,5 \times 10^9$ anys, o sia coincidint amb el període de biopoesi; el diòxid de carboni, que inicialment existia en elevada proporció, minvà fins a un mínim (fa 10^9 anys). La concentració de nitrogen arriba a un mà-

xim fa 1.5×10^9 anys, coincidint amb la lenta aparició d'oxigen. Si bé en aquest model no és al·ludit l'hidrogen, hi ha un acord en el postulat d'Urey segons el qual, essent aquest element el més abundant a l'univers, devia existir en una certa proporció a la Terra primitiva, per descomposició volcànica d'hidrurs metàl·lics, i que, a causa de la seva baixa densitat, part d'ell degué escapar de l'atmosfera.

Quant a les fonts d'energia que devien existir a la Terra primitiva necessàries per a endegar tota la marxa ascendent envers la formació de molècules biogèniques, hom considera que una de les fonts primàries degué ésser la radiació ultraviolada del Sol. Pel fet que la Terra primitiva no contenia sinó traces d'oxigen, no devia existir una capa d'ozó com ocorre actualment i que protegeix els éssers vius del planeta dels efectes mutagènics i carcinogènics de la radiació ultraviolada. Aquesta radiació, però, ocupa un lloc de màxim significat com a factor essencial en l'aparició de l'oxigen a l'atmosfera; en efecte, segons un mecanisme proposat per Urey i anomenat «l'efecte Urey»,¹⁴ per escissió radiolítica del vapor d'aigua s'obtidria hidrogen i oxigen; ara bé, aquesta proporció d'oxigen originat per la radiació UV és molt limitat, i hom l'estima no superior a 0,1 % de l'atmosfera actual segons Berkner i Marshall.¹⁸ Aquest nivell de contingut d'oxigen fou ultrapassat en un punt no determinat encara de la història geològica, fins a arribar a l'1 %, l'anomenat «nivell de Pasteur», o sia la concentració d'oxigen requerida per a canviar el metabolisme dels microorganismes de fermentatius a respiratoris, d'anaeròbics a aeròbics. Els fòssils moleculars (és a dir, productes aïllats d'organismes fòssils que es troben al Pre-cambrià començant pels bacteris incrustats en sediments de més de $3,5 \times 10^9$ anys d'edat des de la seva formació) demostrarien la presència en aquesta època de la funció clorofil·lica, encara que fou molt més evident fa uns $1,5 - 2,0 \times 10^9$ anys amb l'inici dels processos metabòlics aeròbics en els microorganismes.

Una altra de les fonts primàries d'energia a la Terra primitiva i que devia tenir la funció d'activar reaccions pre-biòtiques, és l'energia tèrmica. Hom ha calculat que a la Terra primitiva, poc després de formar-se, la temperatura no era superior a uns pocs centenars de graus en contra de l'opinió segons la qual la Terra era amb una crosta fosa; el progressiu refredament permeté la dissolució dels gasos existents a l'atmosfera en els oceans i llacs primitius; càlculs fets per Urey indiquen que la temperatura de la Terra primitiva no devia excedir els 100° , per a possibilitar en èpoques successives la formació d'oceans i la dissolució dels gasos atmosfèrics. Una temperatura que permetria la dissolució d'amoníac i que fóra suficientment elevada per a accelerar reaccions pre-biòtiques oscil·laria entre $70-80^\circ$; és precisament aquesta temperatura l'emprada per Oró en la seva clàssica síntesi de purines a partir de cianur d'hidrogen i d'amoníac.¹⁹

Altres fonts d'energia en l'ambient primitiu de la Terra, pogueren ésser el cas particular de la tèrmica (com ara l'originada per erupcions volcàniques), la del decaïment de radioisòtops, més abundants durant els primers

estadis de la història geològica, l'energia elèctrica amb descàrregues (que devien ésser més intenses i freqüents que en l'actualitat, i que degueren constituir un factor primordial en la síntesi pre-biòtica, tal com ha quedat demostrat pels experiments pioners de Miller, produint aminoàcids i altres compostos, amb energia elèctrica sobre una barreja de gasos).²⁰ Hom ha proposat a més, que en el xoc de meteorits amb l'atmosfera i llur impacte amb la superfície de la Terra o dels oceans, l'elevada temperatura que això originaria (> 16.000 °K) i la pressió (> 1.500 atm) hauria donat lloc a reaccions amb radicals lliures dels components primitius de l'atmosfera. Durant els últims 5×10^8 anys han xocat amb la Terra més de 40.000 meteorits amb diàmetre superior a uns quants metres i capaços de produir els efectes descrits.

L'element més essencial i distintiu de la Terra, a part de l'atmosfera, és sens dubte l'aigua; som a l'únic planeta del sistema solar que conté aigua en quantitat suficient per a ésser el vector necessari per a l'origen i sosteniment de la vida. L'origen d'aquest element tan essencial ha estat ben debatut; l'origen volcànic n'és una de les hipòtesis; hom creu també que, a causa del gran contingut d'aigua dels cometes (com hom ha pogut comprovar recentment amb els vehicles espacials enviats per a analitzar la composició del cometa Halley i que han confirmat la hipòtesi de Whipple²¹ que els cometes no eren altra cosa sinó unes «boles de neu brutes»), en xocar amb la Terra l'haurien dipositada, tot afegint-la a la que existia d'origen autòcton. L'abundància d'aigua d'un origen o altre degué fer que els oceans primitius cobrissin tota la superfície del planeta (l'anomenada «panthalassa»), i els continents en degueren sorgir a causa de l'activitat volcànica. Els oceans, llacs i tolls poden molt bé, d'acord amb la teoria d'evolució química, haver estat els bressols de vida on tingueren lloc les reaccions pre-biòtiques per l'acció de les fonts d'energia descrites amb els components de l'atmosfera primitiva, tot constituint l'anomenat «brou primordial» (*primordial soup*).²²

L'EVOLUCIÓ QUÍMICA

A la Taula VI han estat mostrades les diverses concepcions sobre l'origen de la vida a la Terra; d'elles hem de descartar, com ja ha estat indicat, el creacionisme perquè no és una concepció científica en no permetre el criteri bàsic de falsabilitat, d'acord amb els preceptes de Karl Popper.²³ Rebutjada així mateix la generació espontània com a possible origen de la vida, romanen la panspèrmia còsmica i l'evolució química. Hom ha indicat la implausibilitat de la primera, perquè, tot i que entra dins el reialme de la concepció científica, en la forma que els seus proponents la conceben apareix com un subterfugi per a traslladar el problema de la biopoesi a altres mons, sense explicar els processos que la realitzaren. Ens queda per tant, com a explicació

científica més plausible de l'origen de la vida a la Terra, l'evolució química, prevista ja per Darwin quan escrivia la frase clàssica:

«Hom ha dit ben sovint que les condicions per a la producció d'un organisme viu existeixen en l'actualitat. Ara bé, si (i quin gran "si") hom pogués concebre un toll petit escalfat amb tota mena de sals fosfòriques, amoníac, llum, electricitat, calor, etc. i que un compost proteínic es formés químicament, llest per a experimentar canvis més complexos, avui dia aquest compost seria devorat instantàniament per organismes o absorbit, cosa que no hauria succeït abans de formar-se les primeres creatures vives».²⁴

La demostració per Pasteur de la inexistència de la generació espontània semblaria contradir la possibilitat de tot origen de la vida a partir de la matèria inerta. En aquest context s'expressava Engels quan formulà una crítica dels experiments de Pasteur en el sentit que si els microbis no es desenvolupaven als seus experiments era per la natura limitada de les condicions emprades; fóra absurd segons Engels «de demanar a la Natura que realitzés en tan poc temps un procés que havia requerit abans, a l'inici de l'origen de la vida, milers d'anys». Per a Haeckel, negar la generació espontània «era acceptar la possibilitat d'un miracle: o la vida sorgeix espontàniament o és produïda per forces sobrenaturals». L'evolució química, en postular l'origen de la vida a partir de la matèria inerta, constitueix un tipus de generació espontània especial i que es distingeix de la que hom predicava als temps clàssics i medievals en què no recorre a cap element màgic, sobrenatural, per a la seva realització, i que, a més, el nombre de biopoesis és tan sols d'una, en contrast amb les creences antigues que feien de la generació espontània un fenomen freqüent.

La teoria de l'evolució química es fonamenta en les tres premisses següents: 1) L'ambient favorable per a la biopoesi en les condicions de la Terra primitiva. 2) Com a una extrapolació i extensió de la teoria de l'evolució biològica formulada per Darwin. L'origen de la vida fóra degut, segons la teoria de l'evolució química, a un procés prolongadíssim, que per estadis successius i ascendents, de molècules més simples a més complexes, produïren (al cap d'uns quants centenars de milions d'anys) el primer organisme viu en la Terra. 3) Finalment, el principi de reductivitat: no existeixen diferències elementals entre organismes vius i matèria inerta. Per tal de donar suport a aquesta tercera premissa basant-se en les dades contingudes en la segona, han estat duts a terme nombrosos experiments amb la finalitat d'obtenir materials biogènics de tota mena, simulant les condicions que hom suposa que devien existir a la Terra primitiva.

L'evolució biològica enunciada per Darwin és la transformació d'espècies, de les més simples a les més complexes, a través d'un temps prolongat, fins a arribar a la cimera de l'home i la fauna i flora actuals. Extrapolant l'evolució biològica cap endarrera, hom observa que, a mesura que ens allunyem del temps present, els fòssils són cada vegada més simples i menys

abundants. Hom arriba al Cambrià (fa 600 milions d'anys), quan la majoria dels metazous desapareixen i tan sols unes formes rudimentàries es troben en sediments (p. e. a Austràlia); més cap endarrera entrant al Pre-cambrià, els fòssils visibles desapareixen per complet dels sediments i en el seu lloc es descobriren en roques de nivells més primitius (fins a 3.800 milions d'anys), microfòssils —organismes que constitueixen el límit inferior de la biopoesi—. Si hom recula més encara, no apareixen més restes de fòssils, indicant que durant aquest interval de 700 milions d'anys des de la formació de la Terra fins a l'aparició dels primers microorganismes, degué existir el període d'evolució química, biopoesi, en què s'haurien format materials primigenis, des dels més simples al començament, fins als més complexos, fins a arribar a la primera cèl·lula. És lògic que hom no trobi fòssils d'aquest període, a causa de la inestabilitat dels productes dels quals es formaren els successius estadis de materials biogènics. En aquesta dificultat de reproduir amb exactitud les condicions tant de l'ambient, com de trobar claus en els sediments que poguessin permetre de reconstruir l'escenari en què es produí el primer microorganisme, rau un gran repte que els científics tracten de superar.

Una sinopsi de l'evolució global terràquia amb indicació dels fòssils moleculars i esdeveniments des de l'inici de la Terra, és descrita esquemàticament a la Taula VII.²⁵

MODELS EXPERIMENTALS PRE-BIÒTICS

El període de biopoesi, emmarcat entre la formació de la Terra (fa uns 4.500 milions d'anys) i l'aparició dels primers microorganismes fòssils (fa 3.800 milions d'anys), límits respectivament superior i inferior, no havent deixat cap clau pel que respecta al procés que degué seguir per a la formació de macromolècules biogèniques a partir de la matèria inerta, fins a l'aparició de la primera cèl·lula, això fa que hom hagi de recórrer a l'experimentació fonamentada en les dades geològiques i astronòmiques sobre la possible constitució de l'ambient primitiu del planeta per a aconseguir la formació dels materials primigenis necessaris per a l'origen de la vida.

Els dos primers models experimentals de simulació de condicions que devien existir a l'ambient primitiu del planeta i que consten com a pioners en el camp de la síntesi pre-biòtica, foren els de Miller-Urey²⁰ i el de Joan Oró,¹⁹ el primer basat en les premisses de la constitució de l'atmosfera de planetes jovians emprant energia elèctrica com a font d'energia i el segon amb una mescla composta de productes derivats de reaccions tèrmiques. El tipus d'experiments de Miller-Urey donà com a resultat, que hom pot qualificar de sensacional, la síntesi dels maons de proteïnes, els aminoàcids; la síntesi de Joan Oró així mateix sorprenent, donà com a producte components

Taula VII. Inici i evolució de la Terra (Sinopsi)

<i>Era geològica (10⁶ anys)</i>	<i>Fòssils moleculars</i>	<i>Esdeveniments</i>
<i>EVOLUCIÓ BIOLÒGICA:</i>		
Cenozoic (70)	Àcids nucleics, carotens	Homo sapiens
Mesozoic (70-230)	Hidrats de carboni	Mamífers
Paleozoic (230-600)	Aminoàcids i polipèptids	Vertebrats primitius
Pre-cambrià (600-3.800)	Àcids grassos, porfirines, terpens (pristà, fità)	Metazous primigenis Microfòssils
<i>EVOLUCIÓ QUÍMICA:</i>		
Pre-biòtica (3.800-4.500)	(Atmosfera primitiva, CH ₄ , H ₂ , NH ₃ , H ₂ O: aminoàcids, polipèptids, purines, pirimidines, nucleòsids)	
Formació de la Terra (4.500)		

(Adaptat de M. Calvin (25), p. 29)

d'àcids nucleics, les purines. Així ens trobem que les primeres síntesis concebudes amb el fonament en condicions pre-biòtiques proporcionen els dos elements bàsics de la constitució de tots els éssers vius: les proteïnes i els àcids nucleics. Després d'aquestes dues síntesis realitzades els anys 50, seguien una veritable allau de treballs en els quals, emprant variacions de les síntesis inicials, hom tractava d'explicar la formació de les diverses molècules biogèniques i duplicar-les. D'aquestes síntesis, hom detallarà tan sols les més destacades, com mostrem a la Taula VIII.

Amb aquestes reaccions és aconseguida la formació de molècules relativament simples, monòmers, que és el primer pas de la formació dels materials primigenis. Els processos de l'evolució pre-biòtica, així, són iniciats amb els models de síntesi pre-biòtica, seguits d'una contínua marxa ascendent de major complexitat que hom pot resumir en:

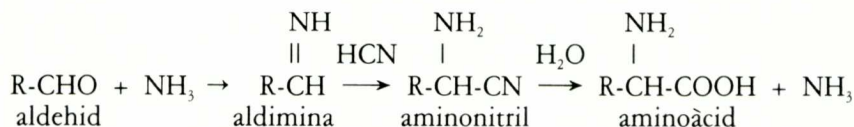
- 1) els components i condicions existents en l'atmosfera i la crosta terràquia primitives;
- 2) la formació per síntesi en condicions pre-biòtiques de materials monomèrics primaris com ara els aminoàcids, purines, hidrats de carboni, lípids;
- 3) la polimerització dels aminoàcids en pèptids i en proteïnes, dels heterocicles purínics i pirimidínics, juntament amb hidrats de carboni i fosfats en polímers d'àcids nucleics. La polimerització de diversos heterocicles en els pigments clorofil·lics i respiratoris;
- 4) la formació a partir d'aquests components polimèrics, mitjançant catalitzadors inorgànics (argiles), dels precursors de cèl·lules, «proto-bionts».

Taula VIII. Sinopsi dels principals models de síntesi pre-biòtica

<i>Investigadors</i>	<i>Fonament</i>	<i>Components</i>	<i>Font d'energia</i>	<i>Productes</i>
Urey, Miller, 1954	Atmosfera planetes jovians	CH ₄ , H ₂ O, H ₂ , NH ₃	elèctrica	aldehids, aminoàcids, pèptids, àcids carboxílics
Oró, 1959	Atmosfera Terra primitiva	HCN, H ₂ O, NH ₃	tèrmica	purines: adenina, guanina
Fox, 1965	Ambient volcànic, tolls	aminoàcids	tèrmica	«proteïnoïds»
Abelson, 1966	Dades geològiques	CO, CO ₂ , H ₂ , N ₂	tèrmica	aminoàcids, pèptids, heterocíclics
Oró, Anders, Arrhenius, 1969-1975	Composició i condicions de la nebulosa solar	CO, H ₂ , N ₂ , NH ₃	tèrmica, pressió, (Fischer-Tropsch)	hidrocarburs, aminoàcids, pèptids, pirimidines, purines

- 5) l'aparició dins el protobiont format amb membrana que l'independitza del medi exterior, de funcions metabòliques, i reproductives iniciadores de l'evolució biològica del primer microorganisme auto-replicable, és a dir, de l'origen de la vida.

Hom ha descrit el primer estadi, el límit superior de la biopoesi; quant al segon i que es refereix a síntesi pre-biòtica dels monòmers, realitzada per Miller seguint el model proposat per Urey, consistí en l'ús de condicions similars a les de la Terra i dels oceans primitius. Per a això empraven un aparell (fig. 1), en el qual els gasos metà, amoníac, hidrogen i aigua barrejats a l'interior del baló i que representen els components de l'atmosfera primitiva, eren sotmesos a una descàrrega elèctrica; els productes de reacció eren recollits pel condensador en un receptor amb una aixeta que permet de treure'n mostres periòdicament per tal de seguir la marxa de la reacció; els productes obtinguts eren aminoàcids, per una reacció tipus Strecker que té com a base la formació inicial d'aldehids, que se sintetitzaven com a intermediaris de la reacció d'amoníac, cianur d'hidrogen i conseqüent hidròlisi:

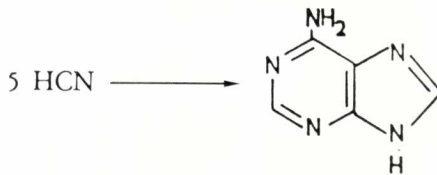


Entre els aminoàcids formats figuren constituents de proteïnes naturals, la glicina, l'alanina i l'àcid aspàrtic; a més hom n'obtenia de no naturals com ara aminobutíric, β -alanina, i diversos àcids com el làctic, acètic, propiònic, i a més, urea i metilamina, entre altres productes. La conclusió que

Stanley Miller tragué dels seus experiments queda expressada en la discussió del seu escrit aparegut el 1954:²⁰

«Les idees (d'una possible síntesi pre-biòtica) són, naturalment especulatives, perquè no sabem si efectivament la Terra posseï una atmosfera reductora quan es formà, ja que la majoria dels components geològics han estat alterats durant els quatre o cinc mil milions d'anys, des de la seva formació, i així des d'aleshores cap evidència no ha estat trobada encara en aquest respecte... sí que hom pot afirmar, però, que compostos orgànics biogènics no han pogut ésser sintetitzats en una atmosfera oxidant, la qual cosa, permetria de concloure que la Terra devia tenir un ambient d'atmosfera reductora en els seus primers estadis evolutius i que la vida devia haver sorgit del mar de compostos orgànics quan la Terra tenia aquest tipus d'atmosfera. Aquest argument es fonamenta en la premissa que per a l'origen de la vida haurien hagut d'ésser presents, en aquesta Terra primitiva, un gran nombre de compostos orgànics similars als que entren en la formació del primer organisme».

Quant al model experimental que conduí Joan Oró a sintetitzar diversos compostos en condicions d'una atmosfera primitiva a la Terra, cal assenyalar el gran significat que ateny la facilitat amb què hom obté un dels components bàsics dels àcids nucleics, l'adenina, a partir de molècules simples com ara l'amoníac, el cianur d'hidrogen i l'aigua amb l'ajut d'energia tèrmica. Una barreja d'aquests components escalfats durant diversos dies a temperatures variables (27-100°) resultà en la formació no tan sols d'adenina, sinó també d'altres purines, aminoàcids (glicina, alanina, àcid aspàrtic) i una sèrie de compostos intermediaris de la formació de l'adenina, com ara la 4-aminoimidazol-5-carboximidina i la 4-aminoimidazol-5-carboxiamida.¹⁹ Essencialment, la sèrie de reaccions consisteix en una «pentamerització» del cianur d'hidrogen en adenina, ja que:



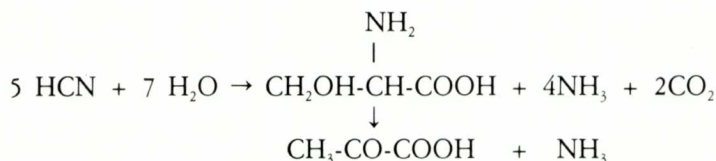
Segons Oró:

«La validesa científica d'aquests experiments en relació amb el principi de continuïtat evolutiva de la matèria és demostrada quan hom observa que, a partir d'unes dotze molècules interstel·lars (Taula V), poden ésser obtinguts en el laboratori pràcticament tots els monòmers bioquímics fonamentals i que aquestes molècules interstel·lars forneixen ensem les condicions necessàries per a certs processos de síntesi orgànica».⁷

Cal fer notar a aquest respecte com vaig mencionar en la comunicació de la IV Trobada de recerca experimental en física i química a Prada el 1985,²⁶ que, com a productes intermediaris de la síntesi de l'adenina en les condicions estipulades per Oró, obtinguérem fraccions de la reacció d'amoniac i cianur d'hidrogen a 80°, durant unes hores, les quals posseïen una potent activitat mutagènica en sistemes bacterians, suggerint que, com que la majoria dels mutagèns són carcinògens, en la síntesi pre-biòtica ja devien existir compostos amb la doble activitat mutagènica i carcinogènica, hipòtesi que presentàrem l'any 1980.²⁷

El model de síntesi pre-biòtica descrita per Sidney Fox es basa en la consideració de la gran abundància d'activitat volcànica en la Terra primitiva, tot junt amb els productes de descàrrega elèctrica que degueren formar, d'acord amb la síntesi de Miller, aminoàcids en el «brou primordial» en llacs o tolls de l'ambient primigeni. Així, Fox aconseguí, a partir de barreges d'aminoàcids naturals, sotmesos a temperatura de fusió i vessant aquest producte sobre aigua, la formació de «proteïnoids», polímers dels aminoàcids que tenen tot l'aspecte microscòpic de cèl·lules i als quals atribueix propietats enzimàtiques i metabòliques com a «protoenzims».²⁸

Abelson,¹⁶ per la seva part, adoptà un model de síntesi pre-biòtica basada en dades geològiques segons les quals l'atmosfera primitiva devia ésser constituïda principalment de monòxid i diòxid de carboni, hidrogen i nitrogen, procedents d'emissions volcàniques; quan aquests components eren sotmesos a radiació ultraviolada, es formava cianur d'hidrogen, el qual per reacció amb aigua a pH alcalí (8-9) que era produït en l'oceà primitiu per dissolució de silicats, (sals d'àcid dèbil i base alcalina forta), conduïa a la síntesi d'aminoàcids i altres compostos per la reacció següent:



formant serina que era hidrolitzada a àcid pirúvic, molècula que participa en processos essencials del metabolisme. Argüeix Abelson que, tenint en compte la prolongada acció de les emissions volcàniques (d'uns 3.000 milions d'anys), és molt més plausible aquest model pre-biòtic que el que es limita a uns quants centenars de milions d'anys; la complexitat de les reaccions exigirien aquest temps més prolongat.

Un tipus experimental de síntesi pre-biòtica que es diferencia dels exposats fou investigat per Oró i Yang²⁹ i es fonamenta en la hipòtesi que la nèbula solar (que és constituïda pels materials primigenis dels quals s'originà el sistema solar) podria haver estat el bressol on es formaren les molècules

biogèniques, facilitades per les condicions de pressió i temperatura prevalents abans de la formació de la Terra. El fet observat que es troben en meteorits (Taula III) compostos biogènics (aminoàcids, purines i altres), estimulà Oró a dur a terme experiments de simulació en les condicions de la nèbula solar, emprant la síntesi de Fischer-Tropsch, segons la qual hom sotmet anhídrid carbònic, hidrogen i amoníac a temperatures i pressions elevades en presència de catalitzadors metàl·lics o de silicats, amb què Oró aconseguí la formació de diversos compostos biogènics entre els quals figuraven urea, adenina, guanina i citosina.

Ha estat discutida fins ara la síntesi prebiòtica de monòmers, molècules relativament simples, que són els maons en la formació de substàncies més complexes; aquestes comprenen als oligòmers dels aminoàcids o de nucleòtids; les condicions per a llur formació són més restringides, a causa d'una part, de la dilució, la qual cosa es produeix en una reduïda freqüència d'interacció que donaria lloc a l'oligòmer a partir d'un monòmer, i d'una altra, de la fragilitat dels productes formats. Es presenta, així, la necessitat d'un element protector i accelerador dels processos que hom troba en catalitzadors, bé orgànics, com els descrits per Oró (imidazols, cianamida) o bé inorgànics, argiles com la montmorillonita, que adsorbeixen substàncies biològiques com ara l'adenosina o la guanina, i interaccionen amb altres com els hidrats de carboni, àcids grassos, aminoàcids i proteïnes segons investigacions de diversos autors, entre ells, Steinman.³⁰ En tot cas, aquests catalitzadors han d'actuar: els orgànics per una deshidratació selectiva, i els inorgànics, com a patrons per a l'alineació de monòmers formant polímers; i aquests, ensems, han de posseir la propietat de deslligar-se del patró. Una de les molècules més essencials per a la biopoesi és l'adenina, no tan sols perquè forma part dels àcids nucleics, sinó també d'enzims i per damunt de tot com a component de l'ATP, el trifosfat d'adenosina, el portador de l'energia en tots els éssers vius. El perquè l'adenina posseeix aquest rol tan primordial, d'una part deu consistir en l'extremada facilitat de la seva síntesi pre-biòtica; d'una altra, possiblement la seva presència en major quantitat que altres bases en el «brou primordial» devia constituir el factor decisiu perquè aquestes reaccions fossin afavorides amb aquesta molècula. Hom ha notat en aquest context la gran facilitat de certes síntesis pre-biòtiques i l'estabilitat de les molècules biogèniques que produeix; totes dues característiques van aparellades, paradoxalment, amb l'extrema fragilitat del sistema biològic.

A la qüestió crucial: «qui fou primer, els àcids nucleics o els enzims?», és a dir, com poden formar-se àcids sense catalitzadors del tipus d'enzims com ocorre en la biologia molecular present, i com es pot sintetitzar un enzim sense la presència prèvia d'un àcid nucleic?, la resposta ha d'ésser: tots dos sorgiren en paral·lel; els catalitzadors presents degueren actuar desenvolupant simultàniament aquesta síntesi, malgrat el grau d'implausibilitat que expressen certs autors, entre ells, Bernal³¹ en comentar:

«La imatge d'una molècula solitària de DNA en una platja primitiva originant tota l'evolució de la vida, com ha estat proposat, conté un xic menys de plausibilitat que allò d'Adam i Eva al jardí edènic».

Hom ha tractat també de solventar el problema de la formació de la membrana cel·lular per la seqüència descrita per Oró, segons el qual, començant per la síntesi del tipus Fischer-Tropsch, hom arriba a l'obtenció d'àcids grassos, i a la del formaldehid, monòmer fàcilment assequible, del qual deriva la glicerina. Aquesta, amb àcids grassos i amb la cianamida com a catalitzador en diversos estadis, s'arriba a components lípids més complexos, que formen part de la membrana cel·lular.

En tots els experiments pre-biòtics de simulació de l'atmosfera i condicions primitives per a sintetitzar molècules biogèniques es produeixen constantment totes dues formes de substàncies òpticament actives; és a dir, amb la configuració D i L; a excepció d'alguns casos especials en bacteris, totes les formes dels components dels éssers vius solament incorporen la forma L. Hom ha avançat diverses teories per a explicar per què tan sols una forma d'isòmer òpticament actiu és present en els processos biològics. Hom postula, per exemple, que cristalls asimètrics com ara el quars, podrien actuar com a catalitzadors de superfície, juntament amb la polarització deguda a raigs còsmics o l'efecte Coriolis, resultant de la rotació de la Terra; la prevalença de la forma D sobre la L fóra deguda a una pura casualitat. Bé que al principi ambdós tipus devien coexistir, amb l'evolució un d'ells degué imposar-se per qualsevol dels efectes mencionats.

Ha estat objecte d'una intensa investigació el simular la formació de cèl·lules en un ambient pre-biòtic; hi apareixen dos models: el d'Oparin amb els coacervats¹³ i el de Sydney Fox amb els proteïnoids.²⁸ Diverses combinacions de polímers biològics originen coacervats, com, per exemple, proteïna i hidrat de carboni (histona i goma aràbiga), proteïna amb proteïna (histona i albúmina) i proteïna i àcid nucleic (histona o clupeïna amb DNA o RNA). És natural que aquest tipus de combinacions no puguin ésser considerades com a protocèl·lules, pel fet d'emprar components complexos i ben allunyats dels que devien existir a la Terra primitiva. Els coacervats són petites esferes de poques micres de diàmetre que semblen embolicades per una mena de membrana; amb elles han estat duts a terme diversos tipus d'experiments imitant els processos bioquímics de les cèl·lules presents, des de funcions metabòliques fins a divisió.

Els proteïnoids, ja descrits prèviament, tendeixen a formar esferes amb una estructura similar als coacervats, i hom hi observa fenòmens similars als que ocorren en cèl·lules: formació de brots (com pseudòpodes de certs microbis), presència d'una membrana, divisió en esferes filles i certes funcions bioquímiques. És una qüestió encara no resolta, de saber si tant els models dels coacervats com el dels proteïnoids serveixen per a explicar el primer microorganisme com un «pont» dels polímers pre-biòtics. Els pròxims paràgrafs seran

dedicats a descriure breument els microfòssils del Pre-cambrià que constitueixen el límit inferior de la biopoesi.

EL LÍMIT INFERIOR DE LA BIOPOESI: EL PRE-CAMBRIÀ

Els avenços experimentals de més rellevància que han estat efectuats en l'estudi de l'origen de la vida han estat les síntesis pre-biòtiques iniciades els anys 50 que intenten d'explicar el procés de biopoesi, i el descobriment, els anys 60, de l'existència d'organismes en el Pre-cambrià. No hi havia fins aleshores cap indicació que hi hagués formes de vida enllà de la «barrera» del Cambrià, fa uns 600 milions d'anys; hom creia, així, que la vida s'havia iniciat, d'una forma sobtada i explosiva, al període Cambrià, a causa de la total absència de formes fòssils abans d'aquest temps. El panorama, però, canvià radicalment quan, els anys 60, uns grups de paleontòlegs, primer a Harvard i més tard a la Universitat de Califòrnia, anunciaren el descobriment sensacional de fòssils microscòpics en roques de sediments arcaics que es remuntaven al Pre-cambrià. Aquesta era, que fins aleshores havia estat un «desert paleobiològic» es convertí en una època amb una diversitat de vida que abasta, per les dades més recents, roques del Paleozoic, d'uns $3,8 \times 10^9$ anys a diversos indrets del Canadà, Transvaal i Estats Units i que contenen microorganismes fòssils fins a formacions més joves, com a Austràlia. Hom descobrí que formacions d'algues fòssils, «estromatòlits», que es trobaven en roques d'uns 3×10^9 anys d'edat, contenien diversos tipus de microorganismes fossilitzats. Hom observà, fins i tot en algues unicel·lulars d'uns sediments amb uns 10^9 anys d'edat, la presència de nuclis i el fenomen de divisió cel·lular.

No tan sols han estat descobertes en el Pre-cambrià formes microscòpiques de vida, sinó que, a mitjan decenni dels 60, a Ediacara, Austràlia, hom trobà tot un conjunt de flora i fauna de metazous i plantes marines que dataven d'uns 700 milions d'anys, evidència d'una connexió (*link*) entre els organismes cel·lulars pre-cambrians i la flora i fauna del Cambrià.

Causa una certa estranyesa que aquesta «era de la vida microscòpica» que fou el Pre-cambrià no fos descoberta sinó recentment, malgrat els progressos tan importants de la Paleontologia —així com de l'Astronomia— a les universitats nord-americanes des del final del segle XIX; les raons eren que les investigacions de microfòssils havien absorbit l'atenció dels paleontòlegs, a causa de la riquesa dels camps fossilífers de l'Oest Mitjà i de l'Oest dels EUA, i, a més, de la manca de les eines apropiades per a altres investigacions. Fou amb la introducció de noves tècniques microscòpiques desenvolupades per a l'estudi de pol·len i espores fòssils, els anys 50, que hom procedí a l'estudi de sediments arcaics. No és que els paleontòlegs «badessin»; eren ben conscients, hi tenien un gran interès a esbrinar com i quan es devia iniciar la vida; hi ensopegaven, com ha estat mencionat, amb la barrera del

Pre-cambrià. La situació canvià radicalment des del 1965 amb els paleontòlegs Barghorn i Schopf,³² quan, emprant tècniques microscòpiques especialitzades, pogueren trencar la «barrera». Començant amb l'estudi dels estromatòlits, hom ha anat eixamplant les anàlisis, arreu del món i eixamplant constantment l'antiguitat de les troballes fins al límit actual dels $3,8 \times 10^9$ anys per al Pre-cambrià, tot deixant així un interval de 700 milions d'anys per al període biopoètic, formació de la vida a partir de la matèria inerta.

L'anàlisi dels sediments arcaics contenint microfòssils ha revelat, per estudis de Calvin,³³ Schopf, Kvenvolden i Barghorn,³⁴ la presència d'aminoàcids, hidrocarburs, porfirines i àcids grassos és a dir «fòssils moleculars», la qual cosa suggereix una similitud dels processos bioquímics amb els dels organismes de l'actualitat i indica una continuïtat del procés evolutiu.

Per bé que aquestes troballes han omplert el gran espai, el «desert paleobiològic» del Pre-cambrià, nogensmenys resten sense contestar qüestions com ara: si la vida existia fa 3.800 milions d'anys i no es troben formes intermèdies fossilitzades o fòssils moleculars abans, ¿indica això que realment el període de biopoesi devia tenir lloc durant l'interval de 700 milions d'anys a partir de la formació de la Terra? Tenint en compte la impossibilitat de trobar formes fòssils de molècules o de protoorganismes, cal limitar-se a l'experimentació i a l'especulació. Si aquest camí pot conduir a resoldre la incògnita de com es formà el primer microorganisme, és una qüestió difícil de predir. I predir, com va exclamar Niels Bohr, «és una cosa summament difícil, sobretot quan es tracta del futur».

ÉS LA VIDA A LA TERRA, ÚNICA A L'UNIVERS?

La nostra galàxia, la Via Làctia, era considerada fins ben endinsat el segle XX, com comprenent tot el conjunt de l'univers; hom creia que les «nebuloses» que existien arreu del firmament i que havien estat catalogades al segle XVIII per Messier, eren cossos de matèria difusa tots ells situats dins la Via Làctia. No fou fins el 1925 que Hubble,³⁵ emprant nous mètodes de mesurament de distàncies estel·lars, determinà que un d'aquests cossos difusos, la nebulosa Andròmeda, era una galàxia semblant en magnitud a la nostra Via Làctia, un «univers-illa», ben fora d'ella, a uns dos milions d'anys de llum de distància. Hubble, així, pot ésser considerat un nou Galileo en rompre l'esfera d'un univers reduït a la nostra galàxia. A aquest descobriment seguiren el de nombroses galàxies llunyanes tot a mesura que hom disposava de millors instruments òptics; el mateix Hubble³⁵ observà que les galàxies, com més llunyanes eren, posseïen una major velocitat que les feia distanciar-les unes de les altres, la qual cosa donà lloc a la troballa de l'expansió universal i a les teories cosmològiques basades en el «gran esclat» com a inici de la creació de l'univers.

Essent l'univers tan immens i mostrant una unitat tant de materials com de fonts d'energia i dinàmica, ¿hom pot concebre que l'evolució còsmica, de l'àtom primordial a la formació de galàxies i de sistemes solars, arribant a l'evolució química, biològica i cultural —a més de la tecnològica— tan sols s'esdevingués la nostra Terra? Aquesta possibilitat que la vida s'hagi originat en altres mons en forma similar a la de la Terra divideix l'opinió dels científics en dues bandes: els que —com Hopkins— creuen que la vida és un fenomen únic i el més extraordinari en la història de l'univers i que tan sols es dona a la Terra, i la tendència oposada, com l'expressada per l'astrònom Sagan,³⁶ que estima el nombre de planetes que poden mostrar vida a la nostra galàxia, en un milió; si hom considera que hom compta aproximadament més de 10^{11} galàxies a l'univers observat fins ara, resulta un total de 10^{17} planetes amb possibilitat de vida arreu de l'univers, càlcul que no es desvia sinó d'una unitat logarítmica del total calculat amb la suposició que tan sols 1 de cada 10^3 estels conté planetes amb possibilitat de suportar vida.³⁷

Les condicions per a l'origen i manteniment de la vida similars a les que es donen a la Terra, poden molt bé existir en altres sistemes solars; creure el contrari és simplement un cas de xovinisme geocèntric. Hom pot considerar com a condicions per a l'aparició de vida en un planeta: 1) l'estar situat en un sistema solar on l'estel central és en fase de desenvolupament estable i prolongat, de 8-10.000 milions d'anys, per a possibilitar l'aparició del procés de biopoesi; 2) el planeta en qüestió ha d'ésser a una distància del sol que comporti una quantitat de radiació i temperatura que permetin l'origen i desenvolupament de les reaccions biopoètiques; 3) l'òrbita del planeta a l'entorn del sol ha d'ésser quasi circular; si fos el·líptica amb excentricitat elevada es produirien canvis bruscs de temperatura, desfavorables per a l'existència de la vida; 4) el planeta ha de contenir una atmosfera reductora i amb el líquid vector de reaccions biopoètiques, l'aigua. En tot el sistema solar, tan sols la Terra gaudeix d'aquestes condicions; aquestes, juntament amb la presència de carboni en l'atmosfera, com a possible dipòsit de cossos espacials (meteorits, cometes), converteixen la vida en un fenomen inevitable i que sorgeix en qualsevol lloc on es presenten les condicions esmentades.

La possibilitat d'existència de vida en altres mons amb civilitzacions tecnològiques similars o superiors a la nostra és un tema ben apassionant. Com pot hom arribar a saber si existeixen? Des de fa molt ha estat debatuda aquesta qüestió; així hom ha dissenyat diversos sistemes per a comunicació amb altres mons, des del que fou ideat per la Unió Soviètica els anys vint i que consistia a plantar set grans fogueres a Sibèria, distanciadades entre elles per un gran tret, amb la configuració de l'Ossa Major, per tal de veure si a Mart —que hom creia aleshores habitat— podrien respondre amb un disseny similar. Més recentment també ha sorgit un projecte amb un mètode curiós, el de von Neumann³⁸ d'enviar amb un vehicle espacial un gran rètol d'uns mil quilòmetres de llargària amb l'anunci «drink Coca-Cola», cer-

cant altres planetes enllà del sistema solar... A part d'aquests i molts altres sistemes més o menys fantàstics i anecdòtics, existeixen dues possibilitats raonables d'establir contacte amb altres civilitzacions: per captació de missatges de ràdio, i mitjançant vehicles interstel·lars. Hom ha intentat, en diversos projectes, tant l'un sistema com l'altre, sense cap resultat, fins ara, que denoti l'existència d'altres mons habitats.

Sorgí la vida a la Terra, o procedeix d'un altre indret de l'univers? Els partidaris de la panspèrmia en les diverses formes actuals prediquen que un procés tan complex com és el salt de la matèria inerta a la viva, no és possible que es realitzés, segons ells, en un període tan reduït com el que va des de la formació del planeta fa 4.500 milions d'anys fins a l'aparició del primer microfòssil i fòssils moleculars, fa 3.800 milions d'anys. Així ho creuen investigadors com Shaw, Brooks³⁹ i Hoyle,⁸ entre altres. Argumenten que, per consideracions de termodinàmica, la possibilitat de formar-se un microorganisme amb la complexitat que mostra la cèl·lula, requeriria un període de biopoesi molt més prolongat, unes 10 vegades més, que el proposat per a la biopoesi terràquua. Per a això caldria la presència d'un estel amb un període de radiació estable molt més prolongat que el del Sol; en tals condicions hom podria arribar a l'aparició d'un microorganisme autoreplicable. Per explicar l'existència de vida a la Terra, aquests autors recorren a la panspèrmia còsmica, bé en forma d'espores transportades a la Terra per radiació o, essent aquesta forma de transport i possible evolució ben improbable, acuden a la visita d'uns OVNI's, que degueren deixar gèrmens dels quals s'inicià el procés biopoètic, i per a final, consideren que el primer microorganisme fou originat, per un mecanisme «desconegut», en altres mons i que —per un sistema que no poden explicar— fou tramès a la Terra,³⁹ la qual cosa no és sinó una admissió de creacionisme.

Contra aquesta tesi, els partidaris d'un origen autòcton de la vida —que són la gran majoria dels científics d'aquesta especialitat— consideren que les reaccions orgàniques posseeixen una gran tendència a formar compostos de major complexitat que els de partença, a causa de l'extraordinària plasticitat de l'àtom de carboni. La gran diversitat d'experiments de síntesi orgànica en condicions pre-biòtiques i que han duplicat virtualment tots els materials biogènics, demostren la plausibilitat d'un origen autòcton de la biopoesi. Per a proponents de l'evolució química a la Terra, com Oró i Kenyon, caldria només un període d'uns milers d'anys, a la Terra primitiva, per a donar lloc al primer organisme; ho afirmen basant-se en experiments de polimerització de cianur d'hidrogen per a produir proteïnes. Cal recordar la facilitat amb què el mateix compost es transforma en adenina, component bàsic dels àcids nucleics. És ben raonable de considerar, com ho ha fet Joan Oró, que en un primer estadi les reaccions biopoètiques són molt ràpides, d'uns pocs segons o, com a màxim, hores, i que el segon estadi d'agregació de molècules biogèniques, que requereix una selecció, exigiria una gran nombre d'intents, un temps més prolongat, d'uns pocs anys —ben distant de la xifra de

milers de milions que postulen els partidaris de la panspèrmia còsmica.⁴⁰

Hom ha esmentat el caràcter de subterfugi que informa la teoria de la panspèrmia còsmica, en eludir la resposta a com es formà la primera cèl·lula en termes de l'ambient terraquí; tan sols cobraria un cert grau de credibilitat si hom trobés, per exploracions amb vehicles interestel·lars, o per la caiguda d'un meteorit contenint microorganismes viables, l'existència de vida en altres mons. Com se sap, les exploracions tant de la Lluna com de Mart i de Venus, amb proves espacials, no han proporcionat cap resultat quant a la presència de materials que podrien indicar l'existència d'organismes. A manca d'aquesta validació, hom ha de concloure que, per ara, la teoria de l'evolució química és la més plausible com a explicació per a l'origen de la vida a la Terra.

REFERÈNCIES

1. SILK, J. The big bang. The creation and evolution of the universe. Freeman, San Francisco 1980.
2. GORE, R. Natl. Geographic Mag., 163, 704 (1983).
3. WEINBERG, S. The first three minutes: a modern view of the origin of the universe. Collins, Glasgow 1977.
4. MALLOVE, E.F. The Washington Post, 3 juny 1984, pag. B-1
5. ORÓ, J. Ann. New York Acad. Sci. 108, 464, 1963.
6. ORÓ, J. Molècules orgàniques a l'espai interestel·lar. Col·loquis Soc. Catal. Biol. VII, 13, 1974.
7. ORÓ, J. La evolución química y el origen de la vida, en Bioquímica y biología molecular, S. Ochoa, L.F. Leloir, J. Oró i L. Cornudella, eds., p. 554. Salvat, Barcelona 1986.
8. HOYLE, F. Astrophys. Space Sci. 66, 77, 1979.
9. WOOD, J.A. i CHANG, S. The cosmic history of the biogenic elements and compounds. NASA, Washington, D.C., 1985.
10. ORÓ, J. Nature (Londres). 190, 389, 1961.
11. PIRIE, N.W. Aspects of the origin of life. M. Florin, ed., Nova York 1960.
12. CRICK, F.H. i ORGEL, L.E. Icarus, 19, 341, 1973.
13. OPARIN, A.I. The origin of life on the earth. Academic, Nova York 1957.
14. UREY, H. The planets, Yale 1952.
15. GARRISON, W.M.; MORRISON, D.C.; HAMILTON, J.G.; BENSON, A.A. i CALVIN, M.; Science, 114, 416, 1951.
16. ABELSON, P.H. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 55, 1365, 1966.
17. HART, M.H. Icarus, 33, 23, 1978.
18. BERKNER, L.V. i MARSHALL, L.C. J. Atmospheric Sci., 22, 265, 1965.

19. ORÓ, J. i KIMBALL, A.P. Arch. Biochem. Biophys. 94, 217, 1961.
20. MILLER, S. J. Amer. Chem. Soc., 77, 235, 1954.
21. WHIPPLE, F.L. Scientific Amer., 230 (2) 48, 1974.
22. HALDANE, J.B.S. Rationalists discovery. Londres 1958.
24. DARWIN, C. lletra a Hooker, 1871, citat en la referència següent, pàg. 5.
25. CALVIN, M. Chemical evolution, Oxford, pàg. 29.
26. GINER-SOROLLA, A. IV Trobada sobre relacions entre la recerca experimental en Física i Química, Universitat Catalana d'Estiu, Prada de Conflent 1985.
27. GINER-SOROLLA, A. i ORÓ, J. Mutagens and carcinogens: Occurrence and role during chemical and biological evolution. 6th Internatl. Conference on the origin of life, Jerusalem 1980.
28. FOX, S.W. i DOSE, K. Molecular evolution and the origin of life, San Francisco 1972.
29. YANG, C.C. i ORÓ, J. *dins* Chemical evolution and the origins of life. R. Buvet i C. Ponnampereuma, eds. p. 155, Nova York 1971.
30. STEINMAN, G. Steinman. Science, 154, 1344, 1966.
31. BERNAL, J.D. Citat per R.E. Dickerson, Scientific Amer. 239, (9), 70, 1978.
32. BARGHORN, E.S.; MEINSCHIN, W.G. i SCHOPF, J.W., Science, 148, 461, 1965.
33. BURLINGAME, A.L.; HAUG, P.; BELSKY, T. i CALVIN, M. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 54, 1406, 1965.
34. SCHOPF, J.W. ; KVENVOLDEN, K.A. i BARGHOORN, E.S. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 59, 639, 1968.
35. HUBBLE, E. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 15, 169, 1929.
36. SHLVOSKII, I.S. i SAGAN, C. Intelligent life in the universe. Holden-Day, San Francisco, p. 409, 1966.
37. GINER-SOROLLA, A. Un nou Gènesi, Edicions 62, Barcelona, p. 58 1983.
38. VON NEUMANN, J. SETI: The Search for Extraterrestrial Intelligence, NASA, Washington, D.C., 1977.
39. BROOKS, J. i SHAW, G. Origin and development of living systems. Academics, Londres, p. 354, 1973.
40. ORÓ, J., comunicació personal.