

ORIGEN I EVOLUCIÓ DE LA VIDA

JOAN ORÓ

Department of Biochemical and Biophysical sciences
University of Houston. Houston, Texas 77004, USA

1. Introducció

L'origen de la vida és un dels temes fonamentals que més ha preocupat l'home des de l'inici de la Història. Aquesta preocupació ha estat promoguda especialment per la filosofia i les religions més que no pas per la ciència. No és estrany, doncs, que les idees sorgides hagin estat sovint acceptades sense una crítica raonada.

L'estudi de l'origen de la vida pot enfocar-se des de dues vessants força diferents. D'una banda, es pot fer un estudi històrico-biològic, que és principalment analític. Per això, es va a la recerca de les restes de vida més antigues en els sediments terrestres, intentant determinar la naturalesa dels primers éssers vius i les circumstàncies que en van afavorir l'aparició. L'altre enfocament que es pot donar al problema és de caire experimental; es tracta d'esbrinar, en primer lloc, quines van ser les condicions del nostre planeta que van fer possible l'aparició de les primeres formes vives, intentant, després, de reproduir-les en el laboratori. Són dos mètodes força diferents, però complementaris i compatibles alhora, que poden ajudar a solucionar l'enigma que tant ha preocupat sempre l'home.

2. Elements biogènics

Si seguim un plantejament evolutiu, considerant els trets més importants en l'evolució de la matèria des de l'hidrogen a l'home, com s'indica en l'esquema simplificat de la Figura 1, abans de discutir les condicions de la Terra primitiva, convé considerar l'entorn còsmic del nostre planeta, les fonts primàries d'on provenen els elements biogènics (H, C, N, O, S, P, etc) i les molècules interstel·lars precursors de la matèria orgànica dels éssers vius.

Més del 98% de la matèria de l'Univers està constituïda per hidrogen i heli, prop de l'1% per neó, carboni, nitrogen i oxigen, i la fracció restant, menys de l'1% per tots els altres elements junts. La síntesi dels elements comença a partir de l'hidrogen. Quatre nuclis d'hidrogen, o protons, es condensen en un nucli d'heli, mitjançant un procés termonuclear que té lloc, a una temperatura de 15 milions de graus, a l'interior de les estrelles, com el nostre sol. Es tracta d'un procés energètic que, sigui dit de pas, ha facilitat l'aparició de la

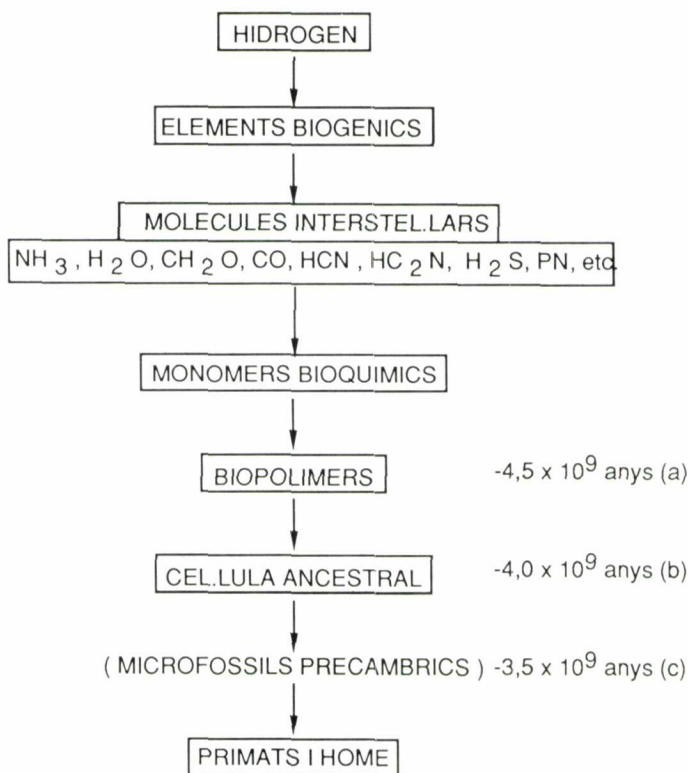


Figura 1. Esquema simplificat d'Evolució de la Matèria. Inclou, molt breument, l'evolució química (nuclear i molecular), la protobiològica (protocel·lular) i la biològica. Els processos més pertinents de l'origen de la vida a la Terra (evolució protocel·lular), que va des de la formació dels biopolímers a l'aparició d'una cèl·lula ancestral, van tenir lloc, probablement, durant 500 milions d'anys després del refredament de la Terra primordial.

vida en el nostre planeta i la seva evolució, durant més de quatre milions d'anys. El carboni, sense el qual la vida terrestre no fóra possible, es forma per la condensació termonuclear de tres partícules alfa, o nuclis d'heli, a l'interior de les estrelles de carboni, a temperatures de cent milions de graus. Processos addicionals de captura de partícules alfa, o protons, generen la major part dels altres elements biogènics dels quals provenen les molècules interstel·lars més importants i precursors de la vida.

3. Molècules interstel·lars

Els elements biogènics es combinen a l'exterior de les estrelles originant molècules senzilles, la presència de les quals ha estat comprovada en els núvols interstel·lars. L'existència d'aquestes molècules a l'espai interstel·lar i la importància de la cosmoquímica

orgànica va ser anticipada per l'autor l'any 1963¹. El 1968 es van trobar, per primera vegada a la nostra galàxia, molècules d'amoniac (NH_3) i aigua (H_2O) i, el 1969, de formaldehid (CH_2O). Des d'aleshores, s'han trobat unes 80 molècules, principalment orgàniques, a la Via Làctia i a d'altres galàxies. Es força interessant veure que algunes d'aquestes molècules havien estat utilitzades en experiments de síntesi abiòtica de composts orgànics. Destaquen entre elles les següents: hidrogen, aigua, amoniac, monòxid de carboni, formaldehid, tioformaldehid, àcid cianhídric, cianoacetilè, nitrur de fòsfor i cianamida, de les quals es poden generar la major part dels composts bioquímics (Vegeu Taula 1 i secció 11). Podríem dir que l'Univers és essencialment orgànic i que està preparat per tal que la vida aparegui allà on s'hi donin les condicions idònies.

L'estat d'ordenació dels àtoms a les diferents molècules orgàniques interstel·lars és, sens dubte, superior al de la distribució a l'atzar dels àtoms a qualsevol fase gasosa o líquida. Això dificulta d'imaginar-se l'existència d'un procés negentròpic (d'augment d'ordre que es dona simultàniament a un increment de desordre a la resta de l'univers) que es requiriria per a la formació de molècules en el buit de l'espai interstel·lar. Aquesta dificultat queda en part resolta quan es té en compte que els radicals diatòmics (C_2 , CN , CO , CH , NH , OH) precursors de la major part d'aquestes molècules es toben en les atmosferes de les estrelles com el sol (6000°K), d'on són finalment expulsats a l'espai interstel·lar, recombinant-se entre ells, i amb l'hidrogen, i generant la gran diversitat de les molècules interstel·lars^{2,3}.

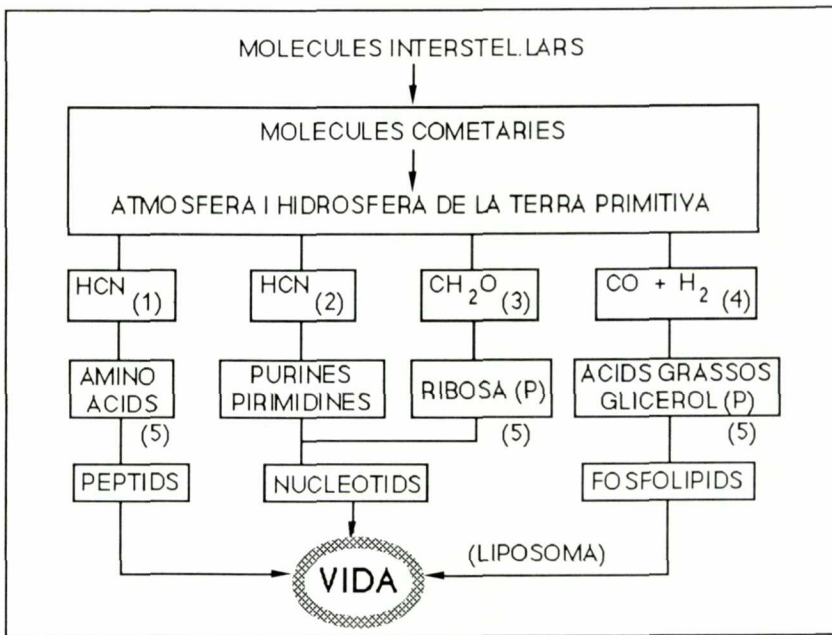


Figura 2. Contribució de Molècules Cometàries a l'Evolució Prebiològica. Formació de monòmers i polímers bioquímics. (1) HCN amb NH_3 i aldehids per a la síntesi d'aminoàcids. (2) HCN amb formamidina i cianat per a la formació de purines; cianoacetilè amb cianat per a la síntesi de pirimidines. (3) Formaldehid amb bases per a la síntesi de ribosa. (4) Monòxid de carboni i hidrogen (Fischer-Trpsch) per a la formació d'àcids grassos. (5) Cianamida per a la formació de pèptids, oligonucleòtids i fosfolipids.

TAULA I. Algunes molècules interstel·lars i les reaccions i molècules bioquímiques (R/M) que se'n poden derivar

Molècules interstel·lars	Fórmules	R/M bioquímiques
1. Hidrogen	H ₂	Reducció
2. Aigua	H ₂ O	Hidroxilació
3. Amoníac	NH ₃	Aminació
4. Monòxid de carboni	CO	Acids grassos
5. Formaldehid	CH ₂ O	Monosacàrids, etc.
6. Aldehids (+HCN, etc.)	RCHO	Aminoàcids
7. Tioformaldehid (o H ₂ S, etc)	CH ₂ S	Cisteïna i Metionina
8. Cianur d'hidrogen	HCN	Purines
9. Cianacetilè	HC ₂ N	Pirimidines
10. Nitrur de fòsfor i cianamida	PN i H ₂ NCN	Fosfats i Polimerització

4. Formació del sistema solar

El sistema solar, en el qual la Terra és inclosa, va formar-se pel col·lapse gravitacional dels núvols interstel·lars que constituïen la nebulosa solar, mitjançant un procés que no fou del tot homogeni. La seva composició probablement va dependre de la dels núvols interstel·lars i de les condicions que es donaven al final de la transformació de la nebulosa en sistema solar. La major part dels materials constituents de la nebulosa solar, després d'un fort augment de la seva temperatura a causa de l'ona de xoc d'una *supernova* i del subsegüent col·lapse gravitacional, va refredar-se ràpidament. Com a resultat d'aquest ràpid refredament, primerament (al voltant dels 1800° K) es va produir la condensació dels silicats líquids i d'altres materials que van formar els còndruls que es troben incrustats en els meteorits condritics. A continuació, es van formar els composts orgànics que es troben en els diferents planetes, satèl·lits, etc. del sistema solar. Els radicals i d'altres combinacions d'elements biogènics que es van formar a altes temperatures devien ser similars als mateixos radicals diatòmics (C₂, CN, CO, CH, NH, OH) que s'observen actualment a l'atmosfera del sol i a la cua dels cometes. Aquestes sis espècies químiques constitueixen sis dels grups funcionals diatòmics més característics dels composts orgànics. Per tant, en condensar-se a temperatures més baixes (al voltant dels 300° K), es degueren convertir, primerament, en molècules similars a les que es troben en els núvols interstel·lars i, posteriorment, en molècules més complexes, com les que es troben en els planetes gegants, en el satèl·lit Tità, en els cometes i en els meteorits condritics carbonacis.

5. Planetes gegants i Tità

Observacions i anàlisis espectroscòpiques, principalment a l'infraroig, mitjançant telescopis terrestres i les naus espacials *Pioneer* i *Voyager*, han permès la identificació d'un gran nombre de molècules dels elements biogènics a les atmosferes dels planetes gegants i d'un dels seus satèl·lits (Tità).

Júpiter és el planeta més gran del sistema solar, amb una massa 318 vegades més gran que la de la Terra, però una densitat de només 1,3 g/cm³. Per això se'l considera representatiu de la composició de la nebulosa solar. Està constituït bàsicament d'hidrogen i heli, amb grans quantitats de metà i amoníac. També s'hi han trobat, però en quantitats més petites, aigua, hidrocarburs lleugers, monòxid de carboni, cianur d'hidrogen, fosfamina i, fins i tot, hidru de germani. La composició de l'atmosfera de Saturn és semblant a la de Júpiter.

L'estudi de Tità, un dels satèl·lits de Saturn, ha estat molt interessant. En primer lloc, la presència d'atmosfera en aquest satèl·lit fou descoberta l'any 1907 des de l'Observatori Fabra de Barcelona per Josep Comas Solà⁴. En segon lloc, aquesta atmosfera és 1,5 vegades més densa que l'atmosfera de la Terra i, a més dels components principals nitrogen, argó, metà i hidrogen, conté una gran varietat de molècules orgàniques volàtils (Taula 2), com el cianur d'hidrogen i el cianoacetilè, que són precursors de les bases puríniques i pirimidíniques dels àcids nucleics dels éssers vius⁵. Es considera que els processos químics que es donen a l'atmosfera de Tità són, en certa manera, semblants als que degueren tenir lloc a l'atmosfera de la Terra primitiva abans que s'hi formés la vida. En tercer lloc, tota la superfície del satèl·lit està coberta per un gran oceà de metà i età, en el fons del qual hi deuen haver grans quantitats de molècules orgàniques sòlides. La temperatura és tan baixa (uns 95° K), que l'aigua sols pot existir en forma sòlida en el fons d'aquest oceà.

TAULA 2. Composició de l'atmosfera de Tità

Components	Abundàncies relatives (aprox.)	
<i>Majoritaris</i>		
Nitrogen (N ₂)	82 %	
Argó (Ar)	12 %	
Metà	6 %	
<i>Minoritaris</i>		
Hidrogen (H ₂)	2000	ppm
Propà (C ₃ H ₈)	30	»
Età (C ₂ H ₆)	20	»
Etilè (C ₂ H ₄)	0,4	»
Acetilè (C ₂ H ₂)	5	»
Diacetilè (C ₄ H ₂)	0,1-0,01	»
Metilacetilè (CH ₃ H ₄)	0,03	»
Cianur d'hidrogen (HCN)	0,2	»
Cianoacetilè (HC ₃ H)	0,1-0,01	»
Cianogen (C ₂ N ₂)	0,03	»
*Dicianoacetilè (C ₄ N ₂) sòlid (pol nord)		
*Diòxid de carboni (CO ₂)	0,01	»
*Monòxid de carboni	60	» (troposfera)

La concentració de metà varia amb l'altitud. La pressió a la superfície és de 1,6 bars i la temperatura de 95 (± 2) °K. L'atmosfera conté un aerosol que és molt absorbent a la zona de l'UV [Cortesia d'Owen, T., vegeu Oró, J. 1986 (3)]. *de D. Gautier, COSPAR, Helsinki, 1988.

6. Asteroides foscos i meteorits carbonacis

S'anomenen meteorits condritics carbonacis aquells que tenen una matriu de color fosc constituïda per silicats i substàncies lleugeres i volàtils, aigua absorvida, sofre i, principalment, matèria orgànica en la forma d'una mescla complexa de composts de carboni, i enmig de la qual es troben els còndruls. La seva densitat (2,2 a 3,5 g/cm³) és més baixa que la dels meteorits de tipus rocós i metàl·lic i són molt més fràgils. La presència de matèria orgànica en aquests meteorits es coneix des de començaments del segle XIX. El grau de complexitat o evolució química que manifesten és més avançat que el de les molècules orgàniques de l'espai interstel·lar. S'hi han trobat hidrocarburs complexos i molts dels composts bioquímics que formen part dels éssers vius, com els aminoàcids, hidroxidàcids, purines i pirimidines.

En un d'aquests meteorits, el Murchison, s'ha trobat un gran nombre d'aminoàcids, vuit dels quals es troben en les proteïnes i els altres, no. Cal destacar que llurs quantitats relatives són semblants a les que s'obtenen en experiments de síntesi abiòtica i que, en ambdós casos, els alfa-aminoàcids es troben en forma racèmica (50% D, més 50% L). Això vol dir que aquests composts es van sintetitzar quan es va formar l'asteroide, o altre cos celest, d'on prové el meteorit, ara fa 4600 milions d'anys, o abans.

Hi ha dues hipòtesis per explicar l'origen d'aquests meteorits. Una n'explica l'origen a partir dels asteroides foscos i, l'altra, a partir dels cometes. Les dades més recents, obtingudes per espectrometria de reflexió, i el càlcul d'òrbites en suggereixen la procedència de la part externa del cinturó asteroïdal (on es troben els asteroides foscos), si bé alguns dels meteorits més fràgils podrien provenir d'alguns cometes. Per una altra banda, els resultats obtinguts recentment a la Unió Soviètica a partir de l'anàlisi del cometa Halley, estableix diferències importants entre els meteorits carbonacis i els cometes (L.Mukhin, comunicació personal, COSPAR, Helsinki, 1988).

7. Els cometes

Dins del sistema solar, els cometes són els cossos més interessants per ésser estudiats des del punt de vista de l'evolució química i de l'origen de la vida. Els motius fonamentals que ens porten a aquesta conclusió són: a) Contenen grans quantitats de composts orgànics que han estat detectats, a diversos observatoris, pels seus espectres d'emissió òptica i de microones (Taula 3). b) Els cometes són considerats els cossos més primitius del sistema solar; és a dir, que la seva matèria no ha experimentat els canvis que s'han donat en els planetes del sistema solar al llarg de la seva formació; canvis que inclouen

TAULA 3. Espècies químiques observades en espectres de cometes, abans de les missions espacials al Halley.

Orgàniques	C	C ₂	C ₃	CH	CN	CO	CS	HCN	CH ₃ CN
Inorgàniques	NH	NH ₂	O	OH	H ₂ O	S			
Metalls	Na	K	Ca	V	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
Ions	C ⁺	CO ⁺	CO ₂ ⁺	CH ⁺	H ₂ O ⁺	OH ⁺	Ca ⁺	N ₂ ⁺	CN ⁺
Pols			Silicats (bandes de reflexió infraroges)						

Cortesia de Delsemme, A; vegeu Oró, 1986 (3)

l'acumulació de planetesimals, contracció gravitacional, diferenciació tèrmica, extrusió i pèrdua de volàtils. c) Les òrbites d'alguns cometes passen prop de la Terra i poden, fins i tot, travessar l'òrbita terrestre quan s'apropen al sol (periheli). Això fa suposar que una certa quantitat de matèria dels cometes deu haver arribat a la Terra, bé per xocs directes o com a fragments i partícules que se n'hagin després.

Un cas específic és el de l'anomenada catàstrofe Tunguska. Hom creu que aquesta fou causada per l'explosió d'un tros (10^{10} g) del cometa Encke, a uns 8 km d'altitud, sobre un gran bosc de la regió de Tunguska (Sibèria), el 30 de juny de l'any 1908. Els arbres quedaren aplanats radialment i en part carbonitzats en una àrea de 50 km de radi. En el subsòl, s'hi han trobat microdiamants i microesfèrules metàl·liques de composició còsmica que n'indiquen l'origen cometari.

Els cometes estan formats per un nucli sòlid, una atmosfera o coma (constituïda principalment per radicals i molècules gasoses) i una cua d'uns quants milions de quilòmetres de longitud (constituïda per un gas rarificat molt ionitzant). Com que s'hi ha identificat diverses molècules inorgàniques i orgàniques, no seria estrany que també hi hagués purines, pirimidines i d'altres composts bioquímics, com els que s'han trobat en alguns meteorits. Tanmateix, no hi ha evidència ni justificació científica que pugui haver-hi vida, com alguns astrònoms havien suggerit⁵.

Tot el que precedeix es podia dir ara fa uns anys i, efectivament, això ha estat confirmat mitjançant espectròmetres de masses i d'altres instruments enviats al cometa Halley l'any 1986, principalment, per les dues naus espacials *Vega* de la Unió Soviètica i per la nau espacial *Giotto* de l'Agència Espacial Europea. Entre molts d'altres composts orgànics identificats per Kissel i Krüger⁶ i d'altres investigadors, hi figuren: formaldehid, polioximetilè, cianur d'hidrogen i adenina (Taula 4). Com que el polioximetilè i l'adenina són polímers purs de formaldehid i de cianur d'hidrogen, respectivament, crec que aquestes observacions constitueixen la millor demostració que els cometes contenen molècules interestel·lars intactes, que no han pogut interaccionar amb d'altres espècies químiques distintes durant els més de 4600 milions d'anys d'existència cometaria degut, probablement, a les

TAULA 4. Tipus de molècules orgàniques deduïdes a partir de l'espectre de masses (PUMA I) del cometa Halley (VEGA 1).

C-H-Composts	C-N-H-Composts	C-O-H-Composts
Pentí	Acid hidrociànic	Metanal (formaldehid)
Hexí	Etanonitril (acetonitril)	Etanal (acetaldehid)
Butadiè	Propanonitril	Acid metanòic (fòrmic)
Pentadiè	Iminometà	i etanòic (acètic) (?)
	Iminoetà	
	Aminoetà Tautomèrics	Acid (iso) ciànic (?)
Ciclopentè, ciclopentadiè	Iminopropè	Metanolnitril Tautomèrics
		Metanalimina
Ciclohexè, ciclohexadina	Pirrolà, pirrol, imidazol	
Benzé, toluè	Piridina, pirimidina (i derivats)	Oximidazol, oxipirimidina
	Purina, adenina	Xantina

Cortesia de Kissel, J. i Krueger, F.R., 1987 (6).

baixíssimes temperatures (d'uns 5 a 50° K) regnants en l'espai gairebé interstel·lar on resideixen els cometes. Així queda confirmat que els cometes són els cossos més primordials del sistema solar.

A partir del gran contingut de composts orgànics, hom podria intuir que els cometes jugaren un paper crucial en la formació de molècules bioquímiques en la Terra primitiva. Així va suggerir-ho l'autor l'any 1961⁷, en relacionar la composició de cianur d'hidrogen dels cometes i la seva col·lisió amb el nostre planeta amb la síntesi de l'adenina en el seu laboratori (Universitat de Houston) a partir de cianur d'hidrogen (vegeu més endavant). En aquest sentit, els cometes representarien la connexió còsmica entre l'univers i la vida del nostre planeta.

8. Condicions de la Terra primitiva

Es desconeixen totalment les condicions en què es trobava la Terra primitiva durant els seus 700 primers milions d'anys ja que no n'han quedat empremtes en el registre geològic. De fet, l'edat de les roques més antigues que es coneixen és de $3,9 \times 10^9$ anys.

Tampoc es té evidència directa de la composició de l'atmosfera primitiva. Les consideracions teòriques fetes i els coneixements de què es disposa permeten suposar que el model més apropiat fóra el d'una atmosfera en un estat intermedi d'oxidació o una mescla de gasos parcialment reduïts i oxidats (en absència, però, d'oxigen lliure). La comparació entre les atmosferes dels planetes terrestres suggereix que una gran part dels elements biogènics devien incorporar-se a la superfície, a l'atmosfera i a la hidrosfera prebiòtiques per la col·lisió de cometes, meteorits i d'altres cossos celest amb la Terra al llarg dels primers 700 milions d'anys de la seva existència.

9. Teoria de la formació del sistema Terra-Lluna i teoria cometària de l'origen de la vida.

Aquest model de grans col·lisions primordials es veu corroborat i unificat amb la recent teoria de A.G.W. Cameron, que ha estat contrastada amb estudis fets mitjançant superordinadors. D'acord amb aquesta teoria, un cos celest amb la massa aproximada del planeta Mart va xocar amb el nostre protoplaneta, injectant el ferro en el nucli de la Terra o causant la fusió i ejecció en òrbita terrestre de la part externa del planeta, que, finalment, es va agregar formant el nostre satèl·lit natural. Així s'explica la formació del sistema Terra-Lluna, amb totes les seves peculiaritats físiques i químiques. Després de la col·lisió catastròfica, el nostre planeta va quedar desproveït de la pràctica totalitat dels composts volàtils de la hidrosfera i de l'atmosfera. Això vol dir que aquests composts hagueren d'ésser recuperats posteriorment mitjançant la captura gravitacional de cometes i d'altres cossos primitius. Aquesta nova teoria, avançada originalment per l'autor l'any 1961⁷, ha estat perfeccionada posteriorment. D'acord amb els nostres càlculs, la quantitat de matèria cometària capturada per la Terra primitiva fou de 10^{23} g, que és més de 10.000 vegades superior a la massa de tota la biosfera actual⁸. Com a confirmació i extensió d'aquesta teoria, càlculs més recents indiquen que la massa cometària total capturada podria arribar fins a 10^{25} g, la qual cosa equivaldria a la massa de tots els oceans terrestres, fet que és compatible amb la idèntica composició isotòpica (H/D) de l'aigua del mar i la del cometa Halley.

Depenent de les velocitats relatives i de l'angle d'intersecció orbital, les col·lisions cometàries foren més o menys catastròfiques. En el pitjor dels casos, les molècules pre-

sents en els nuclis dels cometes deuen haver estat descompostes per les altes temperatures i pressions generades per les ones de xoc de les explosions que en resultaren. No obstant això, en les condicions anòxiques en que es trobava l'atmosfera prebiòtica, els radicals i molècules excitades produïts per la col·lisió deuen haver format composts orgànics més complexos per processos de recombinació. Aquestes conclusions han estat confirmades per experiments realitzats recentment per científics russos (L.Mukhin, comunicació personal, COSPAR, Helsinki, 1988). Algunes de les molècules cometàries, com el cianur d'hidrogen, són força tòxiques. Resulta aparentment paradoxal que la Terra primitiva, que va ser causa de vida, es trobés infinitament molt més contaminada per composts tòxics per a la vida que la Terra actual.

10. Fonts d'energia

Bastants dels composts cometaris (per exemple, formaldehid i cianur d'hidrogen) poden donar lloc a la formació de molècules bioquímiques per processos catalítics sense necessitats de fonts d'energia addicional. Tanmateix, per tal que la síntesi de composts bioquímics es perllongués a un nivell sostingut («steady state») durant prou de temps (prop de 700 milions d'anys), calia disposar de la suficient energia d'una manera continuada. Aquesta energia devia tenir diversos orígens: radiació solar, descàrregues elèctriques, ones de xoc produïdes per col·lisió amb cometes i radiacions ionitzants provinents del Sol. Cal tenir en compte que el flux de llum ultraviolada que arribava a la Terra era considerablement més important que a l'actualitat degut a la gran activitat del Sol, que aleshores es trobava en la fase inicial d'evolució estelar anomenada T-Tauri.

Les formes d'energia més eficients per a la síntesi orgànica són les descàrregues elèctriques i les ones de xoc. En una primera fase, en què provoquen un augment molt alt de la temperatura, les molècules s'ionitzen i es transformen en radicals lliures. En una segona fase, en què es produeix un refredament molt ràpid («quenching»), aquells radicals i ions es recombinen i formen espècies químiques noves molt reactives, com ara àcid cianhídric, cianetilè i aldehids.

11. Síntesi de biomonòmers

La síntesi prebiòtica de monòmers bioquímics va aconseguir-se abans que no es descobrissin les molècules interstel·lars, en posar a prova experimental part de la teoria de l'evolució química d'Oparin³. L'experiment de S.L.Miller⁹, esdevingut ja clàssic, va demostrar la formació de diversos aminoàcids a partir d'una mescla de metà, amoníac i aigua, sotmesa a descàrregues elèctriques. Els aminoàcids es formen per condensació en fase líquida (Strecker) dels aldehids i l'àcid cianhídric generats per les descàrregues elèctriques¹².

Un altre experiment clau va demostrar la formació de l'adenina a partir de l'àcid cianhídric en presència de l'hidròxid amònic¹⁰. Les dificultats inicials en la interpretació d'aquesta síntesi complexa van desaparèixer quan es reconegué que es tractava d'un procés de polimerització progressiva de cinc molècules d'àcid cianhídric catalitzades per una base (NH₄OH). En efecte, la fórmula empírica de l'adenina (HCN)₅ correspon a la d'un pentàmer de cianur d'hidrogen. No deixa de ser una paradoxa que el cianur d'hidrogen, una de les substàncies més tòxiques per als éssers vius actuals, hagi estat la generadora d'una de les molècules més importants per a la vida¹¹. A més d'adenina, també s'obtingueren, per

processos similars, aminoàcids i les altres bases dels àcids nucleics¹². Una vegada sintetitzades les pedres fonamentals de les proteïnes i dels àcids nucleics, la síntesi d'altres monòmers bioquímics essencials, com són la ribosa, els nucleòtids i els lípids, no es feu esperar³. Que no es tracta de processos arbitraris de síntesi química queda demostrat quan, a partir d'unes deu molècules interstel·lars, poden obtenir-se, en el laboratori, pràcticament tots els monòmers bioquímics fonamentals (Taula 1). A més, algunes d'aquestes molècules interstel·lars (per exemple, la cianamida) proporcionen les condicions necessàries per determinats processos de síntesi orgànica, com el de la formació de biopolímers.

12. Síntesi de biopolímers

Independentment de les condicions de la Terra durant la primera fase de síntesi orgànica (síntesi de biomòn timers), allò que realment importa per arribar a esbrinar l'origen de la vida és saber quines eren les condicions en la segona fase de síntesi orgànica, és a dir, aquella que va produir els primers polímers biològics (biopolímers o bio-oligòmers). Les condicions per a aquesta segona fase són relativament restringides, en tractar-se de molècules sumament fràgils.

Aquestes reaccions cal que es realitzin en solucions aquoses i a temperatures moderades (entre 0 i 70° C); cal partir de concentracions suficients de monòmers bioquímics i és necessària la presència d'un condensant o catalitzador; el pH cal que giri al voltant de la neutralitat i es requereixen canvis cíclics de temperatura, a més de condicions d'humitat i sequedat alternants.

En aquestes condicions, i amb l'ajut de la cianamida, molècula existent en l'espai interstel·lar i de fàcil formació a la Terra primitiva, s'han pogut sintetitzar oligopèptids i oligonucleòtids en el nostre laboratori^{3,11}. Els graus de polimerització que normalment s'aconsegueixen són de l'ordre de 8, excepte en alguns casos (vegeu la propera secció) en què s'han emprat monòmers activats. Mitjançant la cianamida, també s'ha aconseguit de sintetitzar fosfatidiletanolamina i d'altres fosfolípids que són essencials per la formació de liposomes de dues capes que equivalen a les membranes protocel·lulars³. Un esquema simplificat de les línies més importants de síntesi prebiòtica es mostra a la Figura 2.

A mena de recapitulació, es pot dir que la necessitat de l'existència d'aigua en forma líquida i de processos cíclics d'evaporació i condensació molecular per tal que es formessin biopolímers va determinar que aquesta crucial i última fase de síntesi prebiòtica quedés limitada a la Terra primitiva i, teòricament, també a aquells altres cossos celestes que hagin pogut gaudir de les característiques gairebé úniques del nostre planeta.

No se sap encara si aquestes condicions es van donar, en algun moment passat, en el planeta Mart o en el satèl·lit del planeta Júpiter, Europa. Afortunadament, s'estan realitzant i planificant noves missions espacials a Mart i a Europa per tal de resoldre aquestes incògnites (vegeu més endavant).

13. Models de replicació molecular

Durant aquests anys passats, en el laboratori del professor Leslie Orgel s'han fet estudis en què s'ha assolit la formació d'àcids nucleics de tipus oligo G (o poli G) a partir d'un motllo de poli C i de substrats derivats del GMP (2 MelmpG). Aquesta és la primera vegada que es demostra el principi de la transferència d'informació a nivell molecular per medis purament químics. Es a dir, es logra sintetitzar una còpia molecular negativa (poli G) a partir d'una molècula original positiva (poli C), cosa que constitueix solament la meitat del procés

replicatiu. Es a dir, fins ara encara no s'ha lograt sintetitzar una còpia positiva (poli C) a partir d'una negativa (poli G). La replicació molecular completa (de positiu a negatiu i, tot seguit, de negatiu a positiu) sols s'ha pogut assolir, per altres investigadors, emprant sistemes molt «artificials», que no poden considerar-se prebiòtics.

La dificultat més greu de totes aquestes investigacions, des del punt de vista prebiòtic, és que parteixen de substrats activats «artificialment», és a dir, del derivat 2-metilimidazòlic del GMP, compost que només s'aconsegueix de sintetitzar en l'absoluta absència d'aigua, situació que és pràcticament impossible que es donés en les condicions de la Terra primitiva. Això vol dir que cal seguir altres camins per resoldre, en condicions prebiòtiques, el problema fonamental de la replicació molecular.

14. Biopolímers autoreplicatius

Una vegada sintetitzats els oligopèptids i els oligonucleòtids convé preguntar-se quins d'aquests biopolímers van ser més importants per l'inici del procés de replicació o reproducció molecular, que és un dels processos més característics de la vida. En els organismes actuals, això és el resultat de la interacció cooperativa de molècules informacionals (DNA, RNA) i catalítiques o enzimàtiques (polimerases).

Estudis recents fets pel professor Thomas Cech i els seus col·laboradors (vegeu 13) indiquen que certs tipus de RNA tenen, no solament la capacitat informacional, sinó també la catalítica de formar i hidrolitzar àcids nucleics. Es tracta dels anomenats ribozims, derivats de l'intron autoentrellaçador del RNA ribosomal de *Tetrahymena* i de RNA d'altres organismes. Aquests tipus de RNA es consideren com si fossin replicases o polimerases de RNA primitives ja que en la presència de pentacitidilats poden donar lloc a la síntesi d'oligocitidilats de més alt grau de polimerització. Hom creu que la part activa catalítica d'aquest RNA resideix en el grup guanosina terminal del RNA ribosomal de *Tetrahymena*, si bé això, fins ara, no s'havia demostrat directament en condicions prebiòtiques.

Estudis més recents fets per en Gil Armengué en el nostre laboratori han demostrat, per primera vegada, que el GTP en presència del substrat d'AMP (o d'altres substrats) en un sistema aquós causa la síntesi d'àcids nucleics amb bons rendiments. Els graus de polimerització (uns tretze) són més elevats que els que normalment s'obtenen en la síntesi d'oligonucleòtids mitjançant la cianamida. És interessant el fet que la síntesi s'observa amb el GTP o la guanosina, però no amb la guanina. Aquests resultats obren un nou camí per resoldre el problema de l'autopolimerització (i autoreplicació) d'oligonucleòtids en condicions prebiòtiques. Al mateix temps, confirmen el mecanisme d'acció suggerit pel RNA ribosomal de *Tetrahymena*. Simplement, el 3'OH del GTP (o guanosina) inicia un atac nucleofílic del 5'P d'un fosfoèster, causant una transesterificació, que pot donar lloc a la síntesi o a la hidròlisi d'àcids nucleics. Mecanismes similars són emprats biològicament per les polimerases i les nucleases de RNA.

15. Molècules i associacions protocol·lars fonamentals

El pas més complicat i, alhora, menys conegut de la cadena evolutiva és aquell que va originar la primera molècula amb capacitat d'autoreplicació. Tan bon punt es van formar aquests primers sistemes moleculars autoreplicatius, probablement van donar-se una sèrie de processos catalítics i d'autoorganització estructural. Arribar a esbrinar com es va produir això equivaldria a conèixer quin va ser el procés d'aparició de la primera cèl·lula ancestral amb capacitat autopoètica, fet que es pot considerar l'esdeveniment més important de la història de l'univers, marcant el pas de la no vida a la vida.

No se sap si les associacions cooperatives de biopolímers sintetitzats de manera no enzimàtica poden proporcionar base suficient per originar la cèl·lula procariòtica, si bé la transició evolutiva del nivell molecular al cel·lular es podria explicar amb l'aparició i subseqüent interacció cooperativa de les següents molècules protocel·lulars fonamentals.

RNA autoreplicatiu codificador. Proto-RNA-cat. Nucleòtids linears de 12 o més unitats de longitud, amb guanosina al terminal 3'OH i amb quatre, o menys, bases diferents. Ha de tenir capacitat catalítica (tipus ribozimàtica) i ha de formar complexos amb d'altres oligonucleòtids complementaris.

Molècula híbrida traductora del codi. Proto-AA-tRNA. Petits oligonucleòtids acabant amb un grup CCA i amb un aminoàcid esterificat al terminal 3'OH. Ha de tenir capacitat de formar estructures intramoleculares i donar lloc a la formació de pèptids.

Pèptid biocatalític. Protoenzim. Petits pèptids linears formats a partir de distints proto AA-tRNA, de 4 o més unitats de longitud, amb aminoàcids funcionals com l'arginina, histidina o serina i amb capacitat catalítica.

Proto-membrana. Sistema de molècules amfíliques (fosfolípids) amb capacitat de formar una estructura liposòmica per a separar la fase protocel·lular interna del medi ambient extern. Molècules prebiòtiques com la fosfatidilcolina formen, espontàniament, associacions liposòmiques reversibles amb una gran capacitat d'encapsulació molecular.

16. Un model d'evolució protocel·lular

Els quatre tipus de molècules protocel·lulars fonamentals mostren els atributs més essencials de la vida. Es lògic de suposar que devien formar part d'una cèl·lula ancestral. Desconeixem, però, el camí més probable per arribar a l'autoensamblatge o integració d'aquestes biomolècules en una entitat cel·lular funcional. Suggerim, a continuació, un dels possibles camins, tot suposant que l'evolució protocel·lular va donar-s'hi en tres fases de progressiva complexitat.

1a. Fase. Formació i encapsulació dels RNA catalítics.

Protocèl·lula de RNA. La capacitat polimeritzant i autoreplicativa dels RNA catalítics o ribozims (Proto-RNA-cat.) descoberta per T.Cech (vegeu 13), fa possible considerar que la funció d'aquestes molècules fou una de les més primàries en l'origen de la vida. El fet que aquesta polimerització es pugui, en part, realitzar a partir de substrats senzills i GTP augmenta la probabilitat que tingués lloc en condicions prebiòtiques en la Terra primitiva, possiblement en un petit llac d'origen cometari on s'hi podrien trobar totes les molècules precursoras necessàries. L'encapsulació d'aquests ribozims, considerats com a replicases, dintre d'un liposoma, en la presència dels substrats adients, farien possible una síntesi més ràpida del RNA autoreplicatiu, procés que induiria, degut al creixement intern, a la subdivisió de l'entitat liposòmica. Podríem dir que aquesta entitat autopoètica és una protocèl·lula de RNA, en teoria una de les formes més primitives de vida.

2a. Fase. Desenvolupament del procés de traducció.

Protocèl·lula de RNA + protoenzims. La formació del RNA traductor (proto-AA-tRNA) requereix la presència d'aminoàcids i oligonucleòtids, aquests últims amb un terminal CCA

(proto-tRNA). L'acilació d'aquest t-RNA podria tenir lloc, d'acord amb Weiner i Maizels (vegeu Weiner, 13), per l'acció de la mateixa RNA-replicasa (o ribozim de Cech), mitjançant un procés de transacilació que és similar al de la transesterificació catalitzat pel ribozim. Així es formarien els derivats aminoacilats del tRNA (proto-AA-tRNA). Tot seguit, i en la presència del proto-RNA informacional, s'iniciaria el procés de traducció donant lloc a la formació d'un oligopèptid, segons la informació preexistent en el codi del proto-RNA. Quan algun dels pèptids sintetitzats resultés ésser un protoenzim que catalitzés amb més intensitat la síntesi de noves molècules de proto-RNA, aleshores començaria un procés autocatalític entre els tres tipus de molècules fonamentals dintre del liposoma. Aquest procés d'*autocatàlisi cooperativa* entre el proto-RNA, els proto-AA-tRNA i els protoenzims és, sens dubte, el procés cibernètic i autoorganitzador més característic de la vida. Es tractaria d'una entitat liposòmica amb intensa capacitat autoopoètica sotmesa a l'acció dinàmica de l'evolució darwiniana. L'existència de protocèl·lules amb aquestes característiques va durar fins que finalment va aparèixer el proto-DNA.

3a. Fase. Última fase d'evolució protocel·lular.

Protocèl·lula ancestral de DNA. Amb la introducció d'una molècula informacional més estable (proto-DNA), que té una capacitat codificadora de màxima fidelitat, i amb el perfeccionament del procés de traducció mitjançant els protoribosomes, l'evolució protocel·lular arribaria al més alt nivell de perfeccionament. Així degué aparèixer la protocèl·lula ancestral de tots els éssers vius actuals. La transició del RNA al DNA es discuteix tot seguit.

17. Transició evolutiva del RNA al DNA

L'aparició de la doble hèlice de DNA com a macromolècula informacional en les cèl·lules de RNA s'explica sobre la base de pressions darwinianes selectives que devien afavorir una major estabilitat i fidelitat de la informació genètica. Els raonaments han estat presentats en detall principalment per Antonio Lazcano¹⁴.

Entre els arguments que indiquen que el RNA fou la primera molècula genètica hi figuren: 1) les propietats catalítiques i autocatalítiques de les molècules de RNA, que no es troben en el DNA; 2) el fet que la major part dels coenzims són derivats dels ribonucleòtids i no pas dels desoxiribonucleòtids; i 3) la síntesi dels desoxiribonucleòtids sempre procedeix de la reducció enzimàtica dels ribonucleòtids, no donant-se mai el procés invers.

Per una altra banda, les protocèl·lules basades en RNA com a molècula genètica tenien greus inconvenients que degueren induir i facilitar la transició evolutiva del RNA al DNA. Els arguments més importants són els següents: 1) la cadena del polímer de 2'-desoxiribosa (DNA) és més estable que la del polímer de la ribosa (RNA), principalment en solucions aquoses en presència de ions de Zn; 2) l'absència d'enzims correctors de les mutacions del RNA introdueix un nivell de mutacions molt més elevat en el genoma de RNA que en el de DNA; 3) la informació genètica en el RNA es degrada més fàcilment que en el DNA pel fet que la citosina és propensa a hidrolitzar-se a uracil, cosa que no pot passar en el cas de la timina del DNA; 4) com que la irradiació per llum ultraviolada (UV) produeix un gran nombre de mutacions, l'absència d'atenuació per manca d'oxigen i ozó a l'atmosfera durant la primera meitat del Precàmbric, va imposar una intensa pressió selectiva que afavorí la implantació de la doble hèlice de DNA, que és molt més estable en les mateixes condicions. Finalment, si el RNA va precedir el DNA, hom pot suposar que la RNA-polimerasa hauria d'ésser un dels enzims més antics, cosa que sembla ser certa.

18. Evolució biològica primigènia.

D'acord amb allò que acabem de dir, és molt possible que les primeres cèl·lules realment competitives fossin quelcom semblant a petites bosses membranoses, que devien contenir aigua, àcids nucleics (RNA i DNA), enzims proteínics solubles i ribosomes. Actualment hi ha bacteris d'un tipus similar amb capacitat de sintetitzar els propis components cel·lulars. A més, hi ha bacteris la informació genètica dels quals és insuficient per a sintetitzar totes les molècules que necessiten per al seu metabolisme i cal que les obtinguin a través de l'alimentació. De la mateixa manera, la primera fase de la vida a la Terra es basà en l'alimentació a partir de la sopa prebiòtica. Fins i tot l'energia devien obtenir-la directament «engolint» ATP i d'altres composts energètics. En augmentar la població cel·lular, però, les reserves energètiques s'escotaren. Aleshores es van desenvolupar mecanismes per a la producció d'energia dins de la mateixa cèl·lula; probablement el primer d'ells fou la fermentació.

Els productes finals de la fermentació encara contenen energia. Això va fer que es desenvolupessin uns altres microorganismes capaços d'aprofitar aquells productes, iniciant, així, una cadena tròfica fermentadora que encara trobem, avui en dia, en zones d'aiguamolls i sediments de llacs. Posteriorment, es van originar d'altres estratègies metabòliques, totes elles aneròbiques, com la fixació de CO₂ pels metanògens, la fotosíntesi aneròbica dels bacteris púrpura i verds, la reducció del sulfat per l'hidrogen i la desproporcionació dels compostos de sofre per bacteris quimiolitotròfics. Recentment han estat publicats estudis detallats sobre l'evolució dels microorganismes. Vegeu Margulis i Guerrero, 1986¹⁵ i Woese, 1987¹⁶. Queda fora del propòsit d'aquest article tot comentar sobre l'evolució de la vida basat en els extensos estudis sobre els arbres filogenètics universals dels tres grans regnes dels éssers vius (arquibacteris, eubacteris i eucariots) i la seva possible relació amb la cèl·lula ancestral anomenada «progenote»¹⁶.

19. Possibilitat de vida mes enllà de la terra.

Sistema Solar

Les anàlisi fetes *in situ* del material de la superfície de Mart, n'indiquen l'absència de matèria orgànica¹⁷. Tanmateix, no es pot descartar que, en el seu passat remot, hi hagi hagut matèria orgànica i fins i tot vida, si es té en compte l'existència d'aigua líquida i d'unes condicions climatològiques més benignes durant els primers 700 milions d'anys d'existència del planeta roig. Aquesta és una de les principals raons pel llançament, aquest juliol passat, de dues naus espacials soviètiques cap a Fobos i Mart. La probabilitat que es trobin composts orgànics a Fobos és elevada. De fet, el seu albedo és comparable al dels asteroides foscos i la seva densitat comparable a la dels meteorits carbonacis. Segons un estudi recent presentat a l'última reunió del COSPAR (Committee on Space Research), celebrada a Helsinki el propassat més de juliol, Fobos (i Deimos també) seria una mostra, capturada en òrbita, dels cossos celestes que col·lisionaven amb el planeta Mart durant la fase final de bombardeig planetari del sistema solar. Per tant, la possibilitat que hi hagi matèria orgànica a Mart en antics sediments enterrats a una certa profunditat nó és negligible. La possibilitat que s'hi trobin microfòssils és molt més remota.

L'únic altre cos d'interés exobiològic és Europa, satèl·lit de Júpiter, que té una superfície recoberta per una gran crosta de gel, sota la qual hom creu que hi ha un vast oceà amb aigua líquida a la temperatura de 4° C. Essent la densitat del satèl·lit de 3 g/cm³ i la seva

compsició semblant a la dels meteorits carbonacis, és altament probable que en aquest oceà «subterrani» hi hagi grans quantitats de matèria orgànica. La possibilitat d'existència de vida és molt més hipotètica. Si es té en compte que les possibilitats que hi hagi vida en d'altres planetes o satèl·lits són encara més reduïdes, podem dir que, en el sistema solar només tenim evidència de l'existència de vida a la Terra. Com hem dit abans, però, convindria completar les missions a Mart i Europa per tal d'esbrinar del tot aquesta qüestió.

Més enllà del sistema solar

Per trobar un cos celest amb vida, es requereix el compliment d'un gran nombre de condicions¹⁸. Les més importants són: a) Caldria que hi hagués una sola estrella central de massa comparable a la del Sol, amb una mitjana de vida de 5000 milions d'anys i que tingués al voltant un sistema planetari amb diversos planetes més petits que Júpiter. b) Un d'aquests panetes hauria de tenir una massa suficient per retenir les molècules volàtils i formar un oceà aquós i una atmosfera prou densa. Aquestes dues fases haurien de llindar amb una fase sòlida (litosfera). c) Els composts dels elements biogènics haurien de formar part de la composició química de l'atmosfera i de la hidrosfera. d) Caldria que aquest planeta es trobés a una distància òptima de l'estrella central i que rebés una quantitat d'energia suficient per tal que l'aigua es trobés la major part del temps en forms líquida, es a dir, entre 0 i 100° C.

Així doncs, fora del sistema solar, es pot pensar que hi ha una certa probabilitat de vida (que podria ser intel·ligent o no) en planetes semblants a la Terra, en altres llocs de la Via Làctia. Mitjançant un telescopi amb detectors d'infraroigs, i provist d'una pantalla coronagràfica, s'ha demostrat la presència, per primera vegada, d'un disc de tipus cometari al voltant de l'estrella β -Pictoris. També s'ha trobat un disc semblant al voltant de l'estrella H.L. Tauri. Si es té en compte la importància dels cometes en l'aparició de la vida, aquestes observacions augmenten les probabilitats d'existència de vida més enllà del sistema solar. Tanmateix, queda per demostrar-hi d'una manera definitiva l'existència de planetes.

No obstant això, sembla que una nova era està començant, puix que en l'última reunió de la «International Astronomical Union» (Agost, 1988) s'han presentat resultats que indiquen l'existència d'objectes planetaris al voltant de 9 de les 18 estrelles examinades per Bruce Campbell i el seu grup d'astrònoms canadencs. Així, per exemple, l'estrella Tau Ceti té un planeta de la grandària de Júpiter. Per tant, pot ser que la meitat de les estrelles de la Via Làctia tinguin sistemes planetaris. Això reforça els càlculs fets anteriorment per Frank Drake que pot haver-hi un planeta amb vida intel·ligent per cada deu milions d'estrelles de la nostra galaxia¹⁸ (Taula 5).

20. Resum i conclusió

Observacions de l'entorn còsmic de la Terra i experiments de laboratori realitzats durant les quatre dècades passades donen suport a la hipòtesi de l'evolució química com explicació científica de l'origen de la vida a la Terra. A grans trets, aquest procés d'evolució va tenir lloc en dos grans períodes, dividits cadascun d'ells en tres fases principals.

TAULA 5. Càcul aproximat de planetes on pot haver-hi vida a la Via Làctia.

Autor	Càcul aproximat	Any
1. Drake, F.D.	10^5	1965 (1980)
2. SSB Conference (ETIL)	10^4 a 10^9	1965
3. Shklovskii, I.S., i Sagan, C.	10^6	1966
4. Kumar, S.V.	10^2 a 10^2	1975
5. Hart, M.H.	1	1975
6. Pollard, W.G.	10^4 a 10^8	1978
7. Jones, E.M.	1	1978
8. Sturrock, P.A.	10^2 a 10^{10}	1980
9. Goldsmith, D. i Owen, T.	L^*	1980
10. Tipler, J.F.	1	1981

* L = temps de duració d'una civilització tecnològica avançada expressat en anys. Per exemple la nostra té escasament 100 anys. Vegeu Oró, 1988(18) i referències allí incloses.

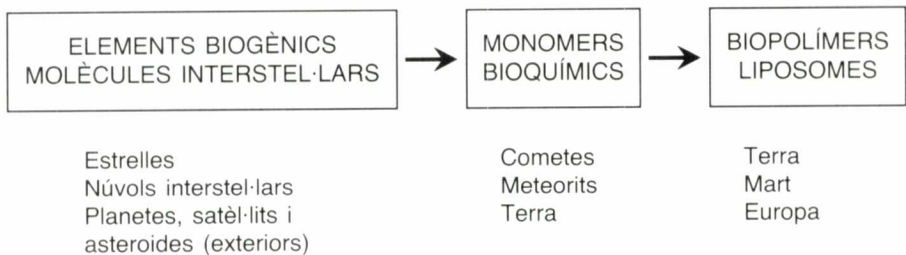
A. Evolució química

1. *Elements biogènics i molècules interstel·lars.* Els elements biogènics i les molècules interstel·lars formades d'aquests elements provenen de les estrelles. Sense la síntesi termonuclear del carboni (paradoxalment de baixa probabilitat relativa), no fóra possible la vida a l'univers.

2. *Monòmers bioquímics.* En els cometes, en els planetes gegants i els seus satèl·lits, en els asteroides foscos i en els meteorits carbonacis, s'hi troben, parcialment transformades, la major part de les molècules interstel·lars, precursors dels monòmers bioquímics. En algun d'aquests cossos celestis (cometes, meteorits carbonacis), s'hi han trobat monòmers bioquímics, com ara aminoàcids i purines.

3. *Biopolímers y Liposomes.* El pas d'evolució química més important va tenir lloc a la Terra primitiva, on els monòmers es van transformar en biopolímers en presència d'aigua líquida gràcies a processos d'evaporació i condensació. Sense l'aportació de matèria orgànica a la Terra primitiva per part dels cometes, és molt probable que no hagués estat possible l'aparició de la vida a la Terra (Vegeu l'esquema següent).

Evolució química (cosmoquímica orgànica)



B. Evolució Protobiològica (Protocel·lular)

L'aspecte més desconegut de l'origen de la vida a la Terra és l'evolució protobiològica que, d'una forma hipotètica, pot dividir-se en les tres fases següents:

1. *Protocèl·lula de RNA.* Aquesta protocèl·lula es va generar tan aviat com els biopolímers de proto-RNA amb capacitat catalítica de síntesi (oligo nucleotídica) foren encapsulats dintre d'uns liposomes.

2. *Protocèl·lula de RNA i protoenzims.* L'adaptabilitat catalítica del RNA va fer possible la generació de molècules híbrides entre els aminoàcids i el RNA (proto-AA-tRNA). Aquestes molècules, interactuant amb el RNA codificador (i a la vegada ribozimàtic), va donar lloc a la formació dels primers protoenzims. Així va iniciar-se un procés d'autocatàlisi cooperativa entre el RNA informacional i els pèptids enzimàtics, que és el més característic de la vida.

3. *Protocèl·lula ancestral (DNA, etc).* La protocèl·lula anterior va arribar a la màxima perfecció amb la transició del RNA al DNA com a molècula genètica més estable i de més alta fidelitat. La introducció dels protoribosomes va augmentar la fidelitat de la síntesi de proteïnes (vegeu la Fig. 3 . on es presenta un model molt esquemàtic de les tres fases d'evolució protobiològica).

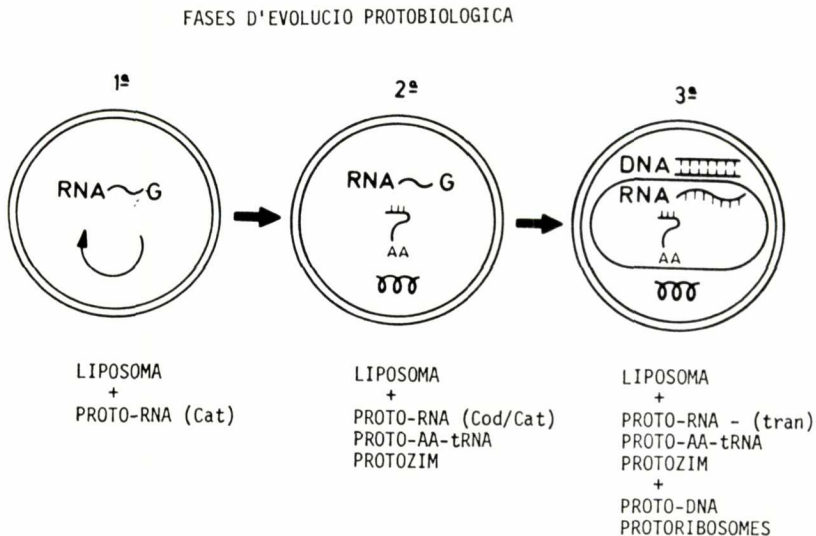


Figura 3. Fases d'evolució Protobiològica. Model hipotètic d'evolució protocel·lular que explica la transició del procés autoreplicatiu del nivell molecular al nivell protocel·lular (autopoiesi) en tres faeses de complexitat progressiva (vegeu text, seccions 16 i 17).

Sols ens resta dir que, amb els actuals avenços de la bioquímica i de la biologia molecular, és molt possible que, abans de la fi d'aquest segle, s'aconsegueixi la síntesi abiòtica d'un ésser autoduplicant. Potser aleshores també haurem rebut senyals indicant-nos l'existència de vida «intel·ligent» extraterrestre.

Si aquest moment arriba, haurem de reconèixer que possiblement descendim de molècules senzilles i que, per tant, és molt possible que no estiguem sols a l'univers. Aquesta reflexió hauria de fer-nos sentir humils i hauria d'inculcar-nos l'amor per la resta de la humanitat (terràquia i, si n'hi ha, també galàctica), si volem que l'espècie humana continuï existint en el planeta. A llarg termini, però, no hi motiu per ésser pessimistes. Passi el que passi, i encara que l'home arribés a desaparèixer, el cicle etern de la matèria i de la vida continuarà, tal com va ser escrit fa molt de temps: «*Pulvis es et in pulverem reverteris*».

Agraïments

S'agraeix l'ajut de Mercè Piqueras en la preparació d'aquest manuscrit, el del Dr. Jordi Mas Gordi en la realització de les taules i figures, així com el de la Dra. Isabel Esteve i d'altres investigadors del departament del Dr. Ricard Guerrero, de la Universitat Autònoma de Barcelona, en discussions sobre l'evolució primigènica de la vida. També s'agraeix l'ajut rebut de la NASA (Grant NGR-44-005-007) per a les investigacions descrites en aquest article.

Bibliografia

1. ORÓ J. (1963). *Studies in Experimental Organic Cosmochemistry*. Ann. N.Y. Sci. **108**,464-481.
2. ORÓ J. (1972). Extraterrestrial Organic Analysis. Space Life Sci. **3**,507-550.
3. ORÓ J. (1986). La Evolución Química y el Origen de la Vida. *In*: Bioquímica y Biología Molecular (Ochoa, S., Leloir, L., Oró, J. & Sols A., eds.) Salvat, Barcelona, 554-572.
4. COMAS SOLÀ J. (1908). Observations des satellites principaux de Jupiter et de Titan. Astro Nachr. **179**,No.4290, 289-290.
5. BAR-NUN A., Lazcano-Araujo, A. & Oró, J. (1981) Could life have evolved in cometary nuclei? Origins of life **11**,388-394.
6. KISSEL J, KRÜGER F.R. (1987). The Organic component in the dust from comet Halley as measured by the PUMA mass spectrometer on board Vega 1. *Nature* **326**,755-760.
7. ORÓ J. (1961). Comets and the formation of biochemical compounds on the primitive Earth. *Nature*, **190**,389-390.
8. LAZCANO-ZRAUJO A, ORÓ J. (1981). Cometary material and the origins of life on Earth. *In*: Comets and the Origin of Life (C. Ponnamperna, ed.) Reidel, Dordrecht. 191-225.
9. MILLER S.L. (1953). A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science* **117**,528-529.
10. ORÓ J. (1960). Synthesis of adenine from ammonium cyanide. *Biochem Biophys. Res. Commun.* **2**, 407-452.
11. ORÓ J. (1977). Química prebiológica y origen de la vida. Una visión personal. *In*: «Avances de la Bioquímica» (L. Cornudella, C.F.Heredia, J. Oró, A. Sols eds.) Salvat, Barcelona, 515-541.
12. ORÓ J. (1965). Stages and mechanisms of prebiological organic synthesis. *In*: «The Origin of Prebiological Systems and of their Molecular Matrices» (S.W. Fox, ed.). Academic Press, N.Y. 137-171.
13. WEINER A.M. (1987) The Origins of Life. *In*: Molecular Biology of the Gene (Watson, J.D., Hopkins, N.H., Roberts, J.W., Steitz, J.A., & Weinr, A.M. authors) The Benjamin/Cummings, Menlo Park, vol II, 1098-1163.

- 14.LAZCANO A. (1986) Prebiotic evolution and the origin of cells. *Treb. Soc. Cat. Biol.* **39**, 73-103.
- 15.MARGULIS L, GUERRERO R. (1986) Not origins of life but evolution in microbes. *Treb. Soc. Cat. Biol.* **39**, 221-271.
- 16.WOESE C.R. (1987) Bacterial Evolution. *Microbiol. Rev.* **51** (No 2), 221-271.
- 17.ORÓ J. (Editor) (1979) The Viking Mission and the Question of Life on Mars. *J. Mol. Evol.* **14** (Nos 1-3) Springer-Verlag, Berlin, 1-233.
- 18.ORÓ J. (1988) Constraints Imposed by Cosmic Evolution Towards the Development of Life. **In:** *Bioastronomy-The Next Steps* (Marxs, G. ed.). Kluwer Academic Publishers, Budapest,161-165.