

## LA VIDA A L'UNIVERS I L'EVOLUCIÓ CÒSMICA

JOAN ORÓ

Department of Biochemical and Biophysical Sciences, University of Houston,  
Houston, Texas, EUA

### INTRODUCCIÓ

Els cometes han estat motiu d'especulació i d'esbalaïment al llarg de la història. Malgrat que el nostre coneixement dels fenòmens cometaris hagi millorat molt durant aquest segle, encara podem reflexionar —amb la perspectiva que la història ens proporciona— sobre el sentit dels mots de Séneca en referir-se als cometes: «Quan aquests focs estranys de formes rares apareixen, tothom vol saber què són i, oblidant qualsevol altra cosa, hom cerca informació sobre l'estrany visitant, dubtant entre quedar-ne meravellat o atemoritzat.» Els darrers anys han estat molt fructífers pel que fa a l'observació i l'estudi d'aquests cossos còsmics; una prova n'és el gran nombre d'articles i llibres que se n'ha publicat. Cal esmentar els nombrosos estudis sobre el cometa Halley, fets des de naus espacials i des d'observatoris situats en el nostre planeta; la col·lisió del cometa Shoemaker-Levy 9 contra Júpiter; i la més recent aparició del cometa Hyakutake. El present article és una breu revisió de la informació científica disponible avui dia que dona suport a la idea, suggerida ja fa més de trenta anys (17), de la participació significativa dels cometes en l'origen de la vida. Per tal de situar aquest concepte en una perspectiva apropiada, revisarem primerament la formació dels elements biogènics dins del context de l'evolució còsmica, destacant-ne, però, els aspectes relatius a la química orgànica.

### COSMOQUÍMICA ORGÀNICA

El nostre univers observable està format principalment d'hidrogen i heli (els dos elements en constitueixen aproximadament un 98%). Els elements biogènics més destacats (C, N, O, S, P) es formen a les estrelles mitjançant processos termonuclears que s'inicien amb la fusió de quatre protons per formar un nucli d'heli. Aquest fenomen s'ha pogut observar en el Sol. Posteriorment, en estrelles carbonàcies, que tenen una temperatura d'uns 100

milions Kelvin, es formen els nuclis de carboni ( $^{12}\text{C}$ ) mitjançant un procés anomenat triple alfa. La formació d'aquest nucli tan remarcable és un esdeveniment únic a l'univers, sense el qual no podríem parlar ara de vida a la Terra. Subsegüents captures de partícules alfa generen oxigen ( $^{16}\text{O}$ ). Finalment, la combustió de l'oxigen, del carboni i del neó produeixen els nuclis de sofre i de fòsfor (1).

Els elements biogènics formats a l'interior de les estrelles es combinen a les atmosferes de les estrelles que han evolucionat, i originen espècies diatòmiques i triatòmiques, com ara CN,  $\text{C}_2$ , CH, NH i OH, i aigua. En prosseguir el refredament es forma una gran varietat de molècules interestel·lars, com ara hidrogen, amoníac, aigua, formaldehid, cianur d'hidrogen, cianur d'acetilè, monòxid de carboni, sulfur d'hidrogen i cianamida. Amb aquestes nou molècules, que s'originen en els espais interestel·lar i circumestel·lar, i amb fosfats, és possible sintetitzar aminoàcids, bases d'àcids nucleics, glícids i mononucleòtids, que són compostos necessaris per a la generació de vida. Podríem dir que la química que predomina a l'espai interestel·lar és química orgànica (18). Cal destacar que els òxids de fòsfor no han estat detectats encara al medi interestel·lar. És probable, però, que hom pugui descobrir les espècies PO i  $\text{PO}_2$  a les envoltos circumestel·lars al voltant de les estrelles abundants en oxigen (Taula 1).

#### FORMACIÓ DEL SISTEMA SOLAR

Fa aproximadament 5 mil milions d'anys es formà el sistema solar pel col·lapse gravitacional d'una nebulosa de pols gasosa de material interestel·lar. En l'estudi de grans de silicat de carboni (SiC) del meteorit Murchison es trobà una relació d'isòtops que indicava que es tractava de matèria provinent d'una supernova de tipus II. Aquesta observació confirma que els meteorits contenen grans de pols refractària d'origen circumestel·lar, i dóna suport a la idea que la condensació de la nebulosa protosolar va desencadenar-se per l'ona de xoc de l'explosió d'una supernova veïna. Durant el seu primer milió d'anys, el sistema solar es trobava en un estat de convulsió en què imperaven les col·lisions contínues de planetesimals o de cometes amb altres cossos més grans. La nau Voyager, de la NASA, mostrà que l'atmosfera de Tità, el satèl·lit més gran de Saturn, està formada principalment per nitrogen i metà. Conté petites quantitats d'età i d'altres compostos orgànics que també es troben als cometes, com ara el cianur d'hidrogen (HCN). Això suggereix que l'atmosfera de Tità pot haver estat originada per l'impacte de cometes.

#### COMETES

En el curs del segle xx els cometes han estat estudiats extensivament. L'atles de Swings i Haser mostra l'espectre d'un gran nombre d'aquests cossos celestes, i s'hi pot observar la predominança de CN,  $\text{C}_2$  i  $\text{C}_3$  entre els seus constituents.

TAULA 1. Molècules, radicals i ions interestel·lars classificats pel nombre d'àtoms

| Àtoms | Molècules, radicals i ions                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2     | H <sub>2</sub> <sup>§</sup> C <sub>2</sub> CH <sup>+</sup> CN CO <sup>§</sup> CS OH NH NO NS SiC* SiO SiS SiN* SO HCl<br>CP* SO <sup>+</sup> NaCl* AlCl* KCl* AlF* PN <sup>§</sup> CO <sup>+</sup>                                                                                                                        |
| 3     | C <sub>2</sub> H CH <sub>2</sub> HCN HNC HCO HCO <sup>+</sup> HOC <sup>+</sup> N <sub>2</sub> H H <sub>2</sub> O <sup>§</sup> HCS H <sub>2</sub> S <sup>§</sup> OCS N <sub>2</sub> O<br>SO <sub>2</sub> SiC <sub>2</sub> C <sub>2</sub> S C <sub>2</sub> O C <sub>3</sub> MgNC MgCN NaCN HNO <sub>§</sub>                 |
| 4     | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> I-C <sub>3</sub> H NH <sub>3</sub> <sup>§</sup> HNCO HOCO <sup>+</sup> HCNH <sup>+</sup> HNCS C <sub>3</sub> N C <sub>3</sub> O H <sub>2</sub> CS C <sub>3</sub> S HOCN<br>H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> H <sub>2</sub> CN H <sub>2</sub> CO <sup>§</sup>                                   |
| 5     | C <sub>4</sub> H C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> H <sub>2</sub> CCC HCOOH CH <sub>2</sub> CO HC <sub>3</sub> N <sup>§</sup> CH <sub>2</sub> CN NH <sub>2</sub> CN <sup>§</sup> CH <sub>2</sub> NH CH <sub>4</sub><br>SiH <sub>4</sub> * C <sub>4</sub> Si* C <sub>5</sub> * HCCNC HNCCC H <sub>2</sub> COH <sup>+</sup>     |
| 6     | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> H <sub>2</sub> CCCC CH <sub>3</sub> OH CH <sub>3</sub> CN CH <sub>3</sub> NC CH <sub>3</sub> SH NH <sub>2</sub> CHO CH <sub>3</sub> OHC <sub>5</sub> H HC <sub>3</sub> NH <sup>+</sup><br>C <sub>5</sub> H HC <sub>3</sub> NH <sup>+</sup>                                                  |
| 7     | C <sub>6</sub> H HC <sub>5</sub> N CH <sub>2</sub> CHCN CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H CH <sub>3</sub> CHO CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>                                                                                                                                                                              |
| ≥8    | HCOOCH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> H CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CN CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH HC <sub>7</sub> N<br>CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> CN? CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub> HC <sub>9</sub> N C <sub>8</sub> H |

<sup>§</sup> Molècules biogèniques.

\* Detectades només en envoltos estel·lars.

Hom n'ha estudiat detalladament la composició i la seva relació amb els planetes terrestres (10), com també el seu possible origen per condensació de grànuls interestel·lars, que haurien format agregats com més va més grans, fins constituir els cometesimals i els planetesimals. Malgrat que hom hagués suggerit la possible existència d'alguna forma de vida als cometes, la temperatura d'aquests cossos celestes, molt baixa, és incompatible amb la vida.

#### EL COMETA HALLEY

La majoria d'elements químics presents als cometes solen trobar-s'hi en proporcions similars a les detectades en altres llocs de l'espai. Únicament l'hidrogen, i probablement també l'heli, hi són en una quantitat mil vegades inferior. El carboni, que es trobava a faltar en la fracció gasosa i que fins al 1986 hom cregué absent en els cometes, es veié que constituïa el 33% de la pols cometària del Halley. L'aigua representa el 80% dels gels volàtils, essent-ne el constituent més abundant. Àcid fòrmic, formaldehid, diòxid de carboni i monòxid de carboni formen més del 13% de la resta de la fracció volàtil. La resta, aproximadament el 7%, inclou molècules relacionades amb els radicals excitats per fluorescència i observats en els espectres tradicionals, com ara cianur d'hidrogen, probablement també acetilè, i H<sub>2</sub>C<sub>3</sub>. La fracció inorgànica de la pols

cometària conté un gran nombre de compostos químics. Els espectròmetres PUMA i PIA, situats respectivament a les naus Vega i Giotto, que analitzaren el Halley, hi detectaren molts compostos orgànics complexos (12). Amb tècniques especials, fou possible d'estudiar-ne detalladament les característiques de la cua des de la Terra i veure'n per primera vegada la pols i els gasos a diferents longituds d'ona (7, 8). Arran d'aquests coneixements, hom ha proposat diversos mecanismes per explicar la formació de la cua. L'anàlisi de la pols cometària del Halley mitjançant espectrometria de masses demostrà la presència de compostos orgànics, com ara purines (adenina, purina i xantina). De tota manera, no s'hi detectaren aminoàcids o productes derivats seus.

#### EL COMETA SHOEMAKER-LEVY 9 (SL-9)

El 1994 fou possible presenciar la col·lisió tan anunciada del cometa Shoemaker-Levy 9 contra el planeta Júpiter, que fou seguida mitjançant telescopis situats a l'espai i a la Terra. Els astrònoms pogueren confirmar la producció de cianur d'hidrogen arran del xoc del SL-9, com també la seva persistència en l'estratosfera d'aquell planeta durant sis mesos (13). Les grans taques negres que quedaren als punts de col·lisió probablement foren causades pel cianur d'hidrogen polimèric, que hom havia suggerit també que podria formar l'escorça del cometa Halley. La col·lisió d'aquest cometa amb Júpiter fou una oportunitat única per observar les conseqüències d'un impacte catastròfic en una atmosfera planetària, i per estudiar els canvis produïts en les condicions químiques i d'excitació de les espècies atòmiques i moleculars. Un dels resultats més significatius de les observacions realitzades des de la Terra per C. Cosmovici i els seus col·laboradors fou la detecció de «jets» d'aigua molt potents utilitzant un nou espectròmetre, acoblat al disc de 32 metres d'un radiotelescopi d'Itàlia. La presència d'aigua —que no havia estat detectada a Júpiter amb anterioritat— a l'atmosfera d'aquell planeta es perllongà aproximadament dos mesos; això demostra que els cometes poden aportar grans quantitats d'aquest compost i dels compostos orgànics presents a les seves atmosferes, com també que les molècules poliatòmiques poden perdurar després dels impactes, cosa que augmentaria les probabilitats de formació de vida, si l'ambient fos adequat.

#### EL COMETA HYAKUTAKE. ORIGEN DELS COMETES

Més recentment hem estat testimonis de la presència d'un altre cos estrany a la nostra volta celeste. El cometa Hyakutake sorprengué els científics, pels raigs X d'alta energia que emetia i perquè, a més de cianur d'hidrogen, contenia metà i età en grans quantitats, com també monòxid de carboni, alcohol metílic, metà, aigua i molts d'altres compostos constituïts per elements biogènics. Actualment la gran nebulosa d'Oort, que és esfèrica i està situada a

unes 100.000 UA del Sol, i el cinturó discoidal de Kuiper, situat a més de 50 UA del Sol, són dos reservoris de l'espai d'on surten molts dels cometes, i són objecte d'estudi per esbrinar-ne la rellevància. També s'està estudiant el paper de Júpiter i d'altres planetes externs com a amortidors de les col·lisions dels cometes amb els planetes terrestres, especialment amb la Terra. Segons sembla, si no hagués estat per la influència moderadora de Júpiter, la vida no s'hauria desenvolupat a la Terra o, a tot estirar, hauria estat efímera; o potser s'hi hauria estabilitzat, però de manera molt precària.

La presència de gasos nobles pesants (argó, kriptó i xenó) a la nostra atmosfera i a les atmosferes d'altres planetes interiors del sistema solar, com també la presència de compostos volàtils a l'atmosfera (26), són una prova més de les col·lisions anteriors. Owen i els seus col·laboradors demostraren que la proporció de gasos nobles atrapats pel gel que es diposita a una temperatura d'aproximadament 50 K, està d'acord amb les dades obtingudes en l'anàlisi dels gasos nobles pesants de la Terra, i del planeta Mart d'acord amb els meteorits marcians, si se n'extrapolen els resultats. Aquesta seria la temperatura a la qual s'hauria format la regió Urà-Neptú de la nebulosa solar, una temperatura que, curiosament, concideix amb la de formació del cometa Halley. Podríem dir que el nostre planeta ha experimentat moltes col·lisions cometàries.

#### EL CONTACTE CRETACI-TERCIARI (K/T)

Com Carl Sagan expressà en una conferència general sobre l'origen de la vida, «els cometes la dugueren i els cometes se l'endugueren». Referint-se a extincions de sistemes vius, féu esment de les col·lisions dels cometes, com degué ser el cas del contacte Cretaci-Terciari (K/T), originat per la col·lisió d'un cometa o d'un asteroide (2), que se suposa que fou la causa de la desaparició dels dinosaures fa uns 65 milions d'anys.

Aquesta col·lisió amb la Terra, a la península de Yucatán, causà el cràter Chicxulub, un dels més grans del planeta. Com a conseqüència d'aquest xoc, es degué produir l'extinció dels dinosaures i de moltes altres espècies, afavorint les condicions per al desenvolupament dels mamífers que, en la seva evolució, originarien els prosimis i els simis, dels quals sorgí la línia del homínids i, finalment, l'espècie *Homo sapiens*.

Altres extincions incidentals o periòdiques caracteritzen el que hom coneix com a evolució puntual, que contrasta amb l'evolució gradual proposada per Darwin. El coneixement d'aquestes col·lisions dóna suport a la teoria que suggereix que els cometes, asteroides i altres cossos menors del sistema solar haurien tingut un paper destacat en l'aportació de precursors necessaris per a l'emergència de la vida al nostre planeta; i que, de manera incidental o periòdica, han modificat el curs de l'evolució biològica. Pot semblar sorprenent, però la nostra existència ha estat possible gràcies a aquella col·lisió còsmica produïda fa uns 65 milions d'anys.

## PEDRES QUE VÉVEN DEL CEL

La Terra rep el bombardeig continu de projectils còsmics relativament petits, que hom anomena meteorits. En alguns casos es tracta de condrites carbonàcies, que contenen compostos orgànics. Ja en el segle XIX, J. J. Berzelius (1779–1848) analitzà l'Alais, una d'aquestes condrites carbonàcies, que caigué a França el 1806. Recentment s'ha trobat molts meteorits a l'Antàrtida. Dels meteorits que hom ha estudiat, un dels més interessants és el que caigué a la ciutat de Murchison (Austràlia) el 1969. Conté una mescla complexa de compostos orgànics monomèrics, com ara àcids carboxílics, aminoàcids, hidroxiàcids, àcids fosfònics, amides, amines, purines (adenina i guanina) i una pirimidina (uracil), alcohols, compostos carbonil, i hidrocarburs polars, aromàtics i alifàtics. S'hi ha identificat uns setanta-cinc aminoàcids, vuit dels quals són constituents corrents de proteïnes, i alguns d'altres participen també al metabolisme dels éssers vius. Molts, però, no s'han trobat mai en sistemes biològics. Quant a la quiralitat dels carbonis alfa, tots els aminoàcids són racèmics. Aquesta característica, i algunes d'altres, com ara l'elevada relació deuteri-hidrogen, semblen indicar que aquests aminoàcids se sintetitzaren a partir de precursors interestel·lars (9, 24). En aquest meteorit també s'han trobat alquil fosfonats, amb el grup alquil (de  $C_1$  a  $C_4$ ) unit a l'àtom de fòsfor del grup fosfat, que també hi és present. Aquesta troballa suggereix un possible origen dels àcids fosfònics en la molècula interestel·lar PC.

## FOSFAT CÒSMIC

Les anàlisis fetes mitjançant espectròmetre de masses indiquen la presència de fòsfor ( $^{31}\text{P}$ ) al nucli dels grans del cometa Halley (12). Feia temps que se sabia que els meteorits contenen minerals amb fosfats; per tant, era lògic que hi hagués fòsfor en forma de fosfat al nucli dels cometes. Per comparar, en les condrites carbonàcies (tipus I), la proporció de fòsfor és de 0,1 % del pes, quantitat que està d'acord amb les proporcions relativament baixes d'aquest element biogènic. Un estudi més aprofundit de les partícules de pols interplanetària podria aportar noves dades sobre la composició dels cometes. En diverses partícules interplanetàries, suposadament d'origen cometari, hom ha observat uns pics dels anions  $\text{PO}_2$  i  $\text{PO}_3$  en llurs masses espectrals (27), que indiquen la presència de fosfat als cometes. Fins ara hom no havia parat esment en els possibles orígens dels fosfats que han participat en l'evolució química i prebiològica. Si les dades suara esmentades es confirmen en posteriors treballs de recerca, podríem afirmar que els cometes, a més d'aportar a la Terra primitiva els compostos de carboni necessaris per sintetitzar aminoàcids, purines, pirimidines i glícids, també hi aportaren fosfats, que haurien format els nucleòtids.

## LA FORMACIÓ DEL SISTEMA TERRA-LLUNA

A partir dels estudis fets en el model proposat per A. G. W. Cameron (5) hom desenvolupà la teoria que propugna que el sistema Terra-Lluna s'hauria format per la col·lisió contra la proto-Terra d'un cos celest de massa aproximada a la del planeta Mart. En el xoc, aquest cos hauria injectat a la Terra el ferro que conté el nucli del nostre planeta avui dia. A més, hauria causat la fusió i l'ejecció en òrbita terrestre de porcions del mantell terrestre, que finalment s'haurien agregat per formar el nostre satèl·lit. Aquest origen explica moltes de les similituds, com també les petites diferències existents entre la composició del mantell terrestre i la Lluna; per exemple, l'escassa proporció de ferro que té el nostre satèl·lit. Quant als aspectes dinàmics, també explica el moment angular del sistema Terra-Lluna. L'impacte de la col·lisió i de la temperatura que originà fou de tal magnitud que els elements lleugers i els compostos fàcilment evaporables, com l'aigua, s'escaparen a l'espai interplanetari. És probable que la proto-Terra no tingués una gran quantitat d'aigua, perquè els planetes terrestres s'agregaren en una zona circumsolar desproveïda de compostos volàtils. Acceptada aquesta teoria, quedava la incògnita de l'origen de l'aigua i dels elements i compostos biogènics necessaris per al procés d'evolució química que finalment causaren la biopoesi, o emergència de la vida, al nostre planeta. Cameron creu que l'origen dels compostos volàtils està als cometes i altres cossos menors del sistema solar, que col·lisionaren amb la Terra a les darreres fases de l'acreció terrestre. Aquesta teoria havia estat avançada per l'autor del present article l'any 1961 (17).

## MATÈRIA COMETÀRIA CAPTURADA PER LA TERRA PRIMITIVA

Les dues teories esmentades són complementàries. És a dir, hom pot acceptar, per una banda, que el sistema Terra-Lluna s'hagi format per l'impacte d'una col·lisió amb un cos de gran massa, que provocà la pèrdua vers l'espai de la majoria de compostos volàtils. D'altra banda, els cometes i altres cossos menors d'aquell sistema solar en formació, que xocaren contra el nostre planeta al llarg dels seus primers 600 milions d'anys d'història, degueren aportar-li la major part de l'aigua que té ara, com també compostos biogènics.

La Lluna, que té una massa gravitacional molt més petita que la Terra, no pogué retenir totes les substàncies volàtils i una bona part s'escaparen a l'espai. Actualment, la pressió de l'atmosfera de la Lluna és de  $10^{-10}$  torr. No hi ha dubte que, mentre algunes de les col·lisions aportaren matèria a la Terra, d'altres s'endugueren aigua i compostos volàtils. Els impactes causaren un doble efecte, de captura i expulsió de matèria. Al final d'aquell període, la Terra se'n va sortir amb un augment significatiu de la seva massa, especialment pel que fa a l'aigua, carboni i d'altres elements biogènics, com es creu que degué passar a Mart i a Venus, i també a Tità.

En el primer estudi que vaig fer d'aquest tema, vaig calcular que la quantitat de matèria cometària capturada per la Terra podia haver estat de  $10^{18}$  g, que és aproximadament la massa de tota la biosfera. Més endavant vaig filar més prim i, amb els meus col·laboradors, vaig determinar una quantitat de  $10^{23}$  g (23), que podria ser equivalent a  $10^{22}$  g de carboni, aproximadament tot el carboni que hi ha al nostre planeta. Càlculs posteriors fets per diversos investigadors donen quantitats similars (6). Altres investigadors donen valors mitjans de l'ordre de  $10^{25}$  g, que indicaria que també la major part de l'aigua dels mars terrestres seria d'origen cometari. De fet, la relació entre hidrogen i deuteri (isòtop de l'hidrogen) que s'ha determinat en alguns cometes s'apropa a la relació que hi ha a la Terra entre aquestes dues formes d'hidrogen.

Seria interessant esbrinar si la majoria de cometes atrapats per la Terra primitiva provenien de la regió Urà-Neptú o d'altres regions del sistema solar. Com hem esmentat, hom suposa que els gasos nobles més pesants i la majoria de compostos gasosos presents a l'atmosfera terrestre podrien haver tingut el seu origen a l'esmentada regió Urà-Neptú (26). Els càlculs fets per diversos investigadors des de 1961 sobre la matèria cometària atrapada per alguns dels cossos interiors del sistema solar, s'indiquen en la taula 2.

#### DARWIN, OPARIN I L'EVOLUCIÓ QUÍMICA

En una carta, no molt coneguda, que Darwin escriví a Hooker (4), li explicava de manera resumida l'essència d'una hipòtesi que posteriorment seria desenvolupada per Alexander Ivanovitx Oparin (1894–1980). El punt clau de la idea de Darwin quedava expressat així: «Però si (i quin "si" més gran!) poguéssim imaginar que en algun estanyol d'aigües càlides, amb tota

TAULA 2. Matèria cometària atrapada per alguns cossos interiors del sistema solar\*

|       | Matèria cometària       | Lapse de temps (anys) |
|-------|-------------------------|-----------------------|
| Venus | $4,0 \times 10^{20}$    | $2 \times 10^9$       |
| Lluna | $2,0 \times 10^{20}$    | Acreció tardana       |
| Terra | $2,0 \times 10^{14-18}$ | $2 \times 10^9$       |
|       | $1,0 \times 10^{25-26}$ | Acreció tardana       |
|       | $3,5 \times 10^{21}$    | Acreció tardana       |
|       | $7,0 \times 10^{23}$    | $4,5 \times 10^9$     |
|       | $2,0 \times 10^{22}$    | $4,5 \times 10^9$     |
|       | $1,0 \times 10^{23}$    | $2,0 \times 10^9$     |
|       | $1,0 \times 10^{24-25}$ | $1,0 \times 10^9$     |
|       | $6,0 \times 10^{24-25}$ | $1,0 \times 10^9$     |
|       | $1,0 \times 10^{23-26}$ | $4,5 \times 10^9$     |

\*Adaptat d'Oró et al. (25).

mena de amoníac i sals de fosfòric, i amb llum, escalfor, electricitat, etc., es formés un compost proteic, llest per experimentar encara canvis més complexos...» El 1924, Oparin proposà una hipòtesi raonable d'evolució química prebiòtica. Pensava en un procés gradual d'evolució química, que inclouria la síntesi de molècules bioquímiques com més va més complexes, com a condició necessària prèvia a la formació de les primeres formes de vida a la Terra. D'aquests primers organismes s'haurien originat tots els altres, segons la teoria de Darwin de l'evolució biològica.

Per formular la seva hipòtesi, Oparin s'inspirà en una teoria que Dimitri Mendeleiev formulà sobre l'origen del petroli. Mendeleiev creia que el petroli podia haver-se format pel pas d'aigua molt calenta a través de formacions geològiques profundes que continguessin carburs de ferro. La hidròlisi d'aquests carburs hauria format els hidrocarburs presents en el petroli. Oparin amplià aquesta teoria fins a l'origen de la vida. Hom sap, i Oparin també ho sabia, que el petroli és d'origen biològic. De tota manera, i malgrat que en el nostre laboratori hem aconseguit hidrocarburs alifàtics lineals des d'un a vuit carbonis en la hidròlisi de carburs de ferro mitjançant clorur de deuteri, és molt improbable que una reacció similar hagi estat significativa a la Terra primitiva. La recerca infructuosa de fonts importants de metà a l'interior de la Terra indica aquesta limitació. Oparin, per tant, no encertà completament el seu raonament. S'equivocà en atribuir un origen terrestre a les substàncies biogèniques. D'altra banda, considerà correctament la natura reduïda dels compostos primaris de carboni i nitrogen, com els que hom ha trobat en molts ambients còsmics fora de la Terra, entre els quals l'atmosfera de Júpiter i els cometes.

#### SÍNTESI PREBIÒTICA D'AMINOÀCIDS

El primer experiment que demostrà que els compostos orgànics podien sintetitzar-se a partir de molècules més senzilles, en absència de vida, el realitzà Stanley L. Miller el 1953 (15). Aquest investigador obtingué aminoàcids i altres compostos orgànics a partir d'una mescla estèril d'amoníac, vapor d'aigua, hidrogen i metà, que sotmeté a descàrregues elèctriques i lluminoses. Els compostos obtinguts eren racèmics, i la mescla era similar a la trobada posteriorment en el meteorit Murchison, si bé menys complexa. En l'atmosfera transitòria del cos primitiu del propi meteorit hauria pogut produir-se una síntesi d'aquesta mena. Tanmateix, és molt més probable que la síntesi es realitzés per condensació d'aldehids, amoníac i cianur d'hidrogen d'origen interestel·lar, quan el cos del meteorit assolí temperatures elevades per causa de la seva proximitat al Sol, o per col·lisions amb altres cossos, com també que s'hi originés una fase líquida aquosa transitòria (11), en la qual s'hauria produït la condensació (24). La relació deuteri-hidrogen, com també la relació entre el carboni 13 ( $^{13}\text{C}$ ) i el carboni 12 ( $^{12}\text{C}$ ), semblen abonar aquesta interpretació (19).

Cal destacar la similitud entre els aminoàcids obtinguts experimentalment i els que es trobaren al meteorit Murchison. És possible que l'abundor d'aminoàcids que hom detectà al meteorit reflectís la gran varietat d'aldehids interestel·lars precursors i d'altres molècules que eren presents al cos del meteorit. També cal tenir en compte la presència d'aminoàcids  $\alpha$ -alquil racèmics. Els grups  $\alpha$ -alquil deuen haver-se originat a partir d'acetones interestel·lars. Atès que els aminoàcids  $\alpha$ -alquil no són constituents de les proteïnes, la seva presència al meteorit Murchinson prova la natura extraterrestre dels aminoàcids meteorítics. També cal destacar que la glicina, l'alanina, l'àcid aspàrtic i altres aminoàcids i compostos orgànics poden sintetitzar-se a partir del cianur d'hidrogen en un ambient aquós que contingui amoníac (21).

#### SÍNTESI PREBIÒTICA DE PURINES I PIRIMIDINES

Els  $\alpha$ -aminoàcids són les peces amb què hom basteix els polipèptids i les proteïnes. A més, les bases púriniques i pirimidíniques, juntament amb la ribosa o la desoxiribosa i el grup fosfat, són els components dels mononucleòtids. Aquestes molècules poden condensar-se per formar polinucleòtids, que en la química dels éssers vius estan representats pels àcids nucleics, RNA (àcid ribonucleic) i DNA (àcid desoxiribonucleic). L'essència de l'emmagatzematge de la informació biològica i de la seva transferència es troba en la seqüència de bases d'aquestes dues molècules. Per tant, un aspecte fonamental per resoldre en relació a la formació de biomònimers a la Terra primitiva és la síntesi prebiòtica de les purines i pirimidines. Hom sap la manera de sintetitzar adenina a partir de cianur d'hidrogen en un medi líquid que contingui aigua i amoníac (16). Amb urea i guanidina, hom pot sintetitzar altres purines, partint també de cianur d'hidrogen (22). L'adenina pot sintetitzar-se, fins i tot en gran quantitat, en absència d'aigua (31), i això explicaria la presència d'aquesta molècula en els grànuls de pols del cometa Halley, mentre que no s'hi detectaren aminoàcids, perquè requereixen aigua líquida per a la seva síntesi. També hom sintetitzà les pirimidines uracil i citosina (29) a partir de cianoacetilè, que és una de les primeres cinc molècules detectades a l'espai interestel·lar. Recentment aquestes molècules han estat sintetitzades utilitzant també com a precursor el seu producte hidratat, el cianoacetaldehid (28). A partir de l'uracil, mitjançant una reacció de metilació, també hom ha sintetitzat la timina. Per tant, avui en dia, és possible sintetitzar al laboratori totes les purines i pirimidines necessàries per al RNA i el DNA.

#### FORMACIÓ DE MONOSACÀRIDS, ÀCIDS GRASSOS I LÍPIDS

A partir de formaldehid, que també havia estat detectat al cometa Halley, hom ha pogut sintetitzar els sucres necessaris per formar els mononucleòtids. Hom pot produir pel cap baix uns trenta monosacàrids a partir del formaldehid (19);

essencialment hom ha obtingut totes les hexoses, pentoses —incloent-hi la ribosa—, tetroses i trioses —incloent-hi el gliceraldehid.

Una altra molècula present al cometa Halley i a molts altres cometes és el monòxid de carboni. En presència d'hidrogen i de grànuls de níquel i ferro d'origen cometari, el monòxid de carboni i l'hidrogen originaren hidrocarburs alifàtics i àcids grassos, que poden conduir a la síntesi de fosfolípids si es combinen amb fosfat de glicerina i colina o serina. Al nostre laboratori hom va sintetitzar fosfatidilcolina (lecitina) mitjançant una seqüència de reaccions. La fosfatidilcolina té la propietat d'autoacoblar-se formant estructures conegudes com a liposomes, tancades per una membrana de dues capes similar a la membrana cel·lular (20) (Fig. 1).

#### PRIMERES FORMES DE VIDA A LA TERRA

Diversos autors han estudiat roques que podrien contenir el registre fòssil més antic de les formes de vida primitives. La paleobiologia només ha estudiat amb detall roques molt antigues de Sudàfrica i de l'oest d'Austràlia (30). Ambdues contenen proves de l'existència de vida primitiva: estromatòlits, microfòssils i matèria orgànica d'origen biològic. Aquests tres tipus de proves indiquen que fa 3500 milions d'anys, a la Terra hi havia organismes procariòtics fixadors de diòxid de carboni. La presència de matèria orgànica encapsulada en minerals de fosfat similars a l'apatita, com també la relació existent entre els isòtops de carboni ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ), en dipòsits de roques localitzats al sud de Groenlàndia, que tenen una edat d'uns 3870 milions d'anys, indiquen la possibilitat que aleshores ja existís vida.

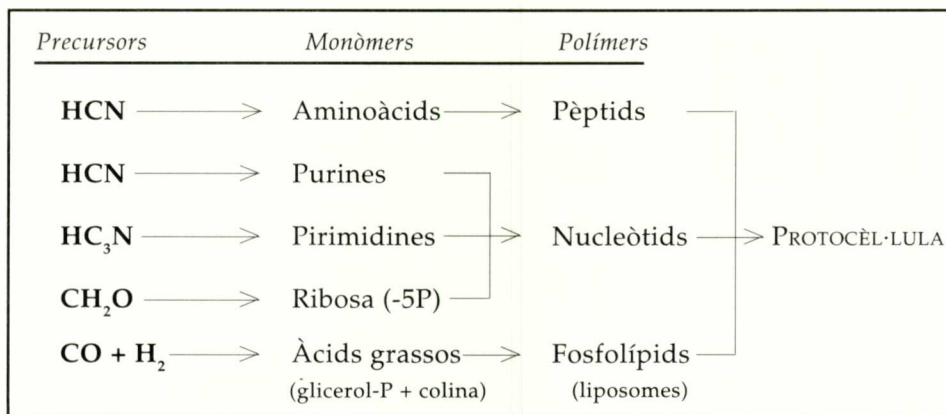


FIG. 1. Síntesi prebiòtica simplificada a partir de molècules cometàries (en fase aquosa).

## VIDA A MART?

Com ha estat suggerit, és possible que la vida a la Terra sigui molt més antiga que els microfòssils que hom hi ha detectat fins ara. L'estiu de 1996 uns científics de la NASA han descrit la troballa de «possibles restes de vida», en un meteorit trobat a l'Antàrtida el 1984 (14). Els estudis realitzats des d'aleshores han dut els investigadors a la conclusió que es tracta d'un cos celeste provinent de Mart. Fa uns quinze milions d'anys, un impacte catastròfic que colpí el planeta roig, degué expulsar-ne aquest meteorit vers l'espai exterior del planeta. Finalment, el meteorit caigué a la Terra fa uns 13.000 anys. La presència, en aquest cos celeste, de compostos orgànics associats a magnetita i a partícules de sulfur de ferro, i a unes estructures microscòpiques ovoides, que han estat interpretades com nanobacteris, fa pensar, als investigadors que les han estudiades, en la possible existència de vida microbiana a Mart en temps remots. Hom ha exclòs qualsevol tipus de contaminació d'origen terrestre, i l'origen marcià es fa evident en comparar la composició química del meteorit amb les dades aportades per la nau Viking, que es posà a la superfície de Mart el 1976. De tota manera, aquests autors no han tingut en compte un aspecte que podria ser essencial per a la comprensió de la qüestió exobiològica: la possible contaminació cometària o asteroïdal del meteorit marcià.

Podem preguntar-nos si és possible que els compostos orgànics trobats al meteorit hi haguessin anat a parar per l'impacte d'un cometa o un asteroide a la superfície de Mart. Abona aquesta possibilitat el fet que la proporció d'hidrocarburs aromàtics policíclics sigui molt semblant a la trobada en el meteorit Murchison (3). Se sap també que les condrites carbonàcies, i probablement també els cossos dels quals en deriven, contenen molts compostos orgànics d'origen extraterrestre (9). Per tant, podria ser que els hidrocarburs aromàtics policíclics trobats al meteorit marcià haguessin arribat a la superfície d'aquell planeta en una col·lisió prèvia d'un cometa o un asteroide fosc.

Europa —un satèl·lit de Júpiter— és un lloc que cal tenir en compte a l'hora de pensar en la possibilitat d'existència de vida extraterrestre dins el sistema solar. Més enllà, també podria haver-n'hi als possibles planetes al voltant de l'estrella  $\beta$ -Pictoris o al voltant d'estrelles de la nebulosa Orió. La informació que hom pugui obtenir sobre els ambients al voltant dels planetes que han estat descoberts recentment, ens permetran determinar si és possible que processos de biopoesi similars als que tingueren lloc a la Terra s'hagin produït en aquests planetes i en d'altres llocs de l'univers.

## FINALMENT, PLANETES EXTRASOLARS

Al llarg dels darrers dos anys s'han produït extraordinaris descobriments d'un cert nombre d'objectes de massa planetària que orbiten estrelles pròximes similars al nostre Sol. Aquesta troballa transforma radicalment la nostra valoració sobre el paper dels sistemes planetaris a la galàxia, comparable

únicament al canvi conceptual que suposà la descoberta feta per Galileu de les quatre llunes majors en òrbita al voltant de Júpiter. Els descobridors d'aquests planetes extrasolars són uns astrònoms que han treballat en aquest projecte durant més d'una dècada, entre els quals cal destacar Michel Mayor i Didier Queloz, de l'Observatori de Ginebra (Suïssa) i Geoffrey Marcy i Paul Butler, de l'Observatori Lick, de Califòrnia (EUA). Per comprendre la dificultat i el mèrit d'aquests descobriments cal tenir en compte l'extrema dificultat de detectar aquesta mena d'astres. La seva lluminositat és molt petita, perquè no emeten llum pròpia. D'altra banda, en trobar-se molt propers a l'estrella que orbiten, la llum del seu sol enlluerna l'observador. Cal recórrer a mètodes indirectes basats en l'efecte Doppler, que requereix tècniques molt complexes basades en l'anàlisi computada dels espectres. Les mesures obtingudes d'aquesta manera estan afectades per una limitació molt significativa: no poden donar més que una cota inferior per al valor de la massa dels astres que orbiten les estrelles considerades. Tot i així, mentre hom no disposi de mesures més precises, les dades aportades pels astrònoms esmentats són de gran interès. El primer planeta (51 Pegasi) en òrbita al voltant d'una estrella de tipus solar fou observat per Mayor i Queloz el 1995. Està situat molt a prop del seu sol (unes 0,05 unitats astronòmiques) i la seva massa és comparable a la del planeta Júpiter. Les observacions inicials d'aquests astrònoms foren confirmades per Marcy i Butler, que anunciaren també la descoberta d'altres dos planetes: 70 Virginis i 47 Ursae Majoris. El planeta 70 Virginis és un astre molt massiu (6–9 vegades la massa de Júpiter) que gira al voltant del seu sol a una distància similar a la del planeta Mercuri en el sistema solar. El planeta 47 Ursae Majoris és més petit (2–4 vegades la massa de Júpiter). Quant a les expectatives que siguin planetes adequats per contenir alguna forma de vida, 51 Pegasus no és un bon candidat perquè té temperatures que arriben als 1300 K. En canvi, 70 Virginis podria tenir una temperatura molt més suau (uns 360 K), que permetria reaccions químiques d'interès des del punt de vista prebiòtic. Finalment, la superfície de 47 Ursae Majoris podria tenir una temperatura de 200 K, molt similar a la de la superfície dels planetes gegants del sistema solar.

## RESUM I CONCLUSIONS

En aquest article hem considerat els processos d'evolució còsmica que poden haver precedit l'aparició de la vida al nostre planeta.

1. Les primeres cinc molècules detectades a l'espai interestel·lar foren  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{HCN}$ , i  $\text{HC}_3\text{N}$ . Juntament amb  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{NCN}$  i fosfats, deuen ser presents també als cometes, i és possible que siguin les molècules precursors de la vida.

2. La primitiva nebulosa solar era una acumulació de gas interestel·lar i de núvols de pols. Els cometes formaven part d'aquest sistema i la seva composició n'indica l'origen interestel·lar.

3. El sistema Terra–Lluna fou el resultat d'una col·lisió massiva resultant de l'impacte d'un cos de la mida de Mart amb la proto-Terra. L'aigua i els compostos volàtils de l'atmosfera del nostre planeta i de la Lluna, s'escaparen a l'espai com a resultat d'aquesta col·lisió.

4. La major part de l'aigua que conté actualment la Terra hi ha estat aportada per acreció cometària. L'estudi de la cua del cometa Halley i de l'impacte del cometa Shoemaker-Levy 9 a Júpiter han demostrat el poder de «supervivència» de l'aigua, del cianur d'hidrogen i d'altres compostos que procedeixen dels cometes.

5. Per tant, hom pot suposar que, a la Terra, (a) el cianur d'hidrogen, l'amoníac i l'aigua líquida produïren aminoàcids i purines; (b) el formaldehid produí ribosa; (c) el cianoacetilè i la urea produïren uracil i citosina; (d) fosfats, bases nitrogenades i glícids es combinaren per produir els nucleòtids; i (e) el monòxid de carboni i l'hidrogen produïren àcids grassos. Aquests àcids grassos poden haver format fosfolípids que s'autoacoblen, i constitueixen estructures de doble capa similars a les membranes cel·lulars (Vegeu Fig. 1).

6. En una segona fase, els aminoàcids i els mononucleòtids es condensen en polipèptids, que són similars a les proteïnes, i en polinucleòtids, que són similars als àcids nucleics (RNA i DNA).

7. D'aquesta manera es pot haver generat el món del RNA; aquest RNA probablement causà l'acoblament de diverses estructures protocel·lulars, que produïrien la cèl·lula ancestral de què parlava Darwin.

8. Els primers microfòssils ben caracteritzats, que es localitzaren a l'oest d'Austràlia, tenen una edat de 3,5 mil milions d'anys. La vida a la Terra podria tenir fins i tot més de 4 mil milions d'anys.

9. No s'ha pogut provar la suposada existència de vida a Mart, al meteorit que hom ha datat de fa 3,6 mil milions d'anys. Els hidrocarburs que s'hi ha detectat podrien haver arribat a Mart amb la col·lisió d'un cometa o un asteroide. Les missions Rosetta, Roland i Stardust podrien confirmar algunes de les idees suara exposades.

10. Una nova era en l'exploració de l'espai ha començat recentment amb la descoberta d'alguns planetes i d'estrelles nanes, al voltant d'estrelles similars al sol, a una distància d'uns 50 anys llum del nostre sistema solar. És el primer cop que la recerca de companys no lluminosos fora del sistema solar ha tingut èxit.

Com hem vist, l'univers és essencialment orgànic: hem d'acceptar que descendim de molècules molt senzilles que deuen haver estat presents al nostre univers des de poc després de la seva gènesi. Algunes de les molècules senzilles que intervenen en la transmissió dels impulsos nerviosos, com ara la glicina i el glutamat, han estat detectades també al meteorit Murchison. Es tracta de neurotransmissors que poden haver existit a l'espai abans de la formació del sistema solar. Per tant, podríem pensar que l'univers no està únicament preparat per a l'emergència de la vida, sinó també de la intel·ligència.

No seria estrany, per tant, que en altres indrets de l'univers hi hagués vida intel·ligent, qui sap si fins i tot més intel·ligent que la que hi ha en el planeta blau del nostre sistema solar. En aquests context en què hem considerat el coneixement de l'univers i de la intel·ligència, voldria esmentar tres idees expressades per tres grans científics. El 1921, Albert Einstein reconeixia que «el misteri més gran de l'univers és la seva comprensió». El 1951, Lewis Thomas, referint-se al que se sabia de la vida, acceptà que «la més gran descoberta científica d'aquest segle ha estat el reconeixement de la nostra ignorància». I, retrocedint fins a començaments de segle, Santiago Ramón y Cajal havia expressat que «mentre el cervell sigui un misteri, l'univers també ho serà».

#### AGRAÏMENTS

Aquest article està basat en la conferència presentada a la reunió *Bioastronomy 96*, celebrada a l'illa de Capri l'estiu de 1996. L'autor desitja reconèixer especialment la participació del Dr. Cristiano Cosmovici en els apartats que tenen a veure amb la cua del cometa Halley, l'impacte del cometa Shoemaker-Levy 9 amb el planeta Júpiter, i amb la possibilitat de vida al planeta Mart. També agraeix la col·laboració de M. Victòria Hernández, Enric Macià i, especialment, de Mercè Piqueras en la preparació de l'article. Així mateix, l'autor desitja reconèixer els esforços de la Generalitat de Catalunya en l'ajuda al desenvolupament de la recerca científica al nostre país.

#### REFERÈNCIES

1. Aller, L. H. (1961). The abundance of the elements. Interscience Pub., New York.
2. Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., Mico, H. V. (1980). Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science* **208**, 1095-1108.
3. Basile, B. P., Middleditch, B. S., Oró, J. (1984). Polycyclic aromatic hydrocarbons in the Murchison meteorite. *Org. Geochem.* **5**, 211-216.
4. Calvin, M. (1969). Chemical Evolution. Molecular Evolution towards the Origin of Living Systems on the Earth and Elsewhere, p. 278. Oxford University Press, New York.
5. Cameron, A. G. W., Benz, W. (1991). The origin of the Moon and the single impact hypothesis IV. *Icarus* **92**, 204-216.
6. Chyba, C. F., Thomas, P. J., Brookshaw, L., Sagan, C. (1990). Cometary delivery of organic molecules to the early Earth. *Science* **249**, 366-373.
7. Cosmovici C. B., Schwarz, G., Ip, W. H., Mack, P. (1988). Gas and dust jets in the inner coma of the comet Halley. *Nature* **332**, 705-709.
8. Cosmovici C. B., Schwarz, G., Ip, W. H., Fink, U. (1995). Imaging of H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> in the coma of comet Halley. *Planet Space Sci.* **43**, 699-708.
9. Cronin, J. R., Chang, S. (1993). Organic matter in meteorites: Molecular and isotopic analyses of the Murchison meteorite. In Greenberg, J. M., Mendoza-Gomez, C. X., Pirronello, V. (ed.), *The Chemistry of Life's Origins*, pp. 205-258. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
10. Delsemme, A. H. (1988). The chemistry of comets. *Phil. Trans. R. Soc. Lond A* **325**, 509-523.

11. Endress, M., Zinner, E., Bischoff, A. (1996). Early aqueous activity on primitive meteorite parent bodies. *Nature* **379**, 701–703.
12. Kissel, J., Krueger, F. R. (1987). The organic component in dust from comet Halley as measured by the PUMA mass spectrometer on board Vega 1. *Nature* **326**, 755–760.
13. Marten, A. et al. (1995). The collision of comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter: Detection and evolution of HCN in the stratosphere of the planet. *Geophys. Res. Lett.* **22**, 1589–1592.
14. McKay, D. et al. (1996). Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH 84001. *Science* **273**, 924–930.
15. Miller, S. L. (1953). Production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science* **117**, 528–529.
16. Oró, J. (1960). Synthesis of adenine from ammonium cyanide. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **2**, 407–412.
17. Oró, J. (1961). Comets and the formations of biochemical compounds on the primitive Earth. *Nature* **190**, 389–390.
18. Oró, J. (1963). Studies in experimental organic cosmochemistry. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **108**, 464–481.
19. Oró, J. (1965). Stages and mechanisms of prebiological organic synthesis. In Fox, S. W. (ed.), *The Origins of Prebiological Systems*, pp. 137–171. Academic Press Inc., New York.
20. Oró, J. (1994). Chemical synthesis of lipids and the origin of life. *J. Biol. Phys.* **20**, 135–147.
21. Oró, J., Kamat, S. S. (1961). Amino acid synthesis from hydrogen cyanide under possible primitive Earth conditions. *Nature* **190**, 442–443.
22. Oró, J., Kimball, A. P. (1962). Synthesis of purines under possible primitive Earth conditions II. Purine intermediates from hydrogen cyanide. *Arch. Biochem. Biophys.* **96**, 293–313.
23. Oró, J., Holzer, G., Lazcano-Araujo, A. (1980). The contribution of cometary volatiles to the primitive Earth. In Holmquist, R. (ed.), *Cospar Life Sciences and Space Research*, vol. 17, pp. 67–82. Pergamon Press, Oxford.
24. Oró, J., Mills, T. (1989). Chemical evolution of primitive Solar System bodies. *Adv. Space Res.* **9**, 105–120.
25. Oró, J., Mills, T., Lazcano, A. (1992). Comets and the formation of biochemical compounds on the primitive Earth. A review. *Origins of Life* **21**, 267–277.
26. Owen, T., Bar-nun, A., Kleinfeld, I. (1992). Possible cometary origin of heavy noble gases in the atmospheres of Venus, Earth and Mars. *Nature* **358**, 43–46.
27. Radicati di Brozolo, F., Bunch, T. E., Chang, S. (1986). Laser microprobe study of carbon in interplanetary dust particles. *Origins of Life* **16**, 236–237.
28. Robertson, M. P., Miller, S. L. (1995). An efficient prebiotic synthesis of cytosine and uracil. *Nature* **375**, 772–774.
29. Sánchez, R. A., Ferris, J. P., Orgel, L. E. (1966). Cyanoacetylene in prebiotic synthesis. *Science* **54**, 784–786.
30. Schopf, J. W. (1983). *The Earth's Earliest Biosphere: Its Origin and Evolution*, pp. 543. Princeton University Press, Princeton.
31. Wakamatsu, H. et al. (1966). Synthesis of adenine by oligomerization of hydrogen cyanide. *J. Org. Chem.* **31**, 2025–2036.