

Química dels orígens

Jordi Llorca

Departament de Química Inorgànica, Universitat de Barcelona, jllorca@kripto.qui.ub.es

Es creu que la vida a la Terra es va originar a partir d'una «sopa primitiva» de molècules orgàniques simples. En sotmetre una atmosfera reductora d'hidrogen, metà, amoníac i aigua a descàrregues elèctriques, Miller va obtenir l'any 1953 molècules orgàniques necessàries per a la vida. Avui, però, se sap que, poc després de formar-se, la Terra tenia una atmosfera dominada per diòxid de carboni, nitrogen i aigua. Llavors és possible que la sopa primitiva es formés a partir de l'adquisició de matèria orgànica sintetitzada en l'espai. L'anàlisi de meteorits primitius, cometes i partícules de pols interplanetària permet conèixer i estudiar a fons el material orgànic format a l'espai.

Terrestrial life is believed to have originated from a «primitive soup» of simple organic molecules. In 1953 Miller obtained organic molecules needed for life when a reductive atmosphere of hydrogen, methane, ammonia and water was exposed to electric discharges. However, it now appears that, shortly after its formation, the atmosphere of the Earth was dominated by carbon dioxide, nitrogen and water. Therefore, the primitive soup may have been formed by organic material from outer space. The analysis of primitive meteorites, comets and interplanetary dust allows a close examination of organic material formed in space.

L'estudi de l'origen de la vida és una tasca necessàriament difícil. No només es tracta de desgranar el conjunt de processos químics que donaren lloc, ara fa uns 3.800 milions d'anys, al primer ésser viu del nostre planeta, sinó que implícitament cal conèixer també les condicions i els «productes de partida» que varen fer possible la transformació de molècules simples a estructures cada cop més complexes i organitzades. De l'origen dels elements químics, per exemple, se'n té força informació, perquè les teories estan ben emparades per les observacions. D'altra banda, la genètica i l'antropologia han permès progressar molt i ja es pot respondre a la pregunta de com van aparèixer els primers homínids i per què van evolucionar. Però l'origen de la vida segueix sent un problema difícil on, no cal dir-ho, la química hi té un paper determinant.

La sopa primitiva

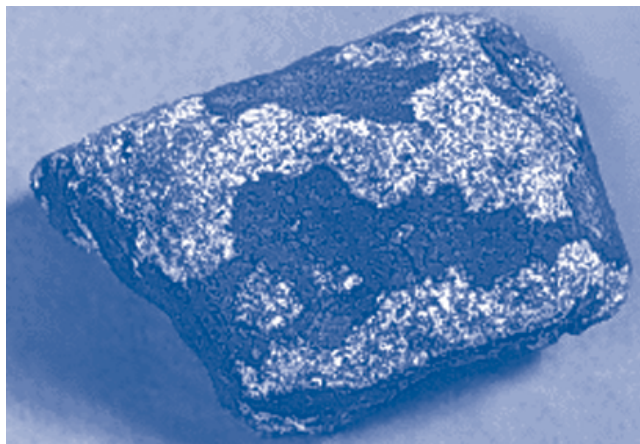
Gairebé totes les teories de l'origen de la vida pressuposen l'existència d'una «sopa primitiva», o dissolució aquosa de molècules orgàniques relativament simples. En aquesta sopa, les molècules anirien organitzant-se en estructures més i més complexes fins originar el primer sistema viu, és a dir, un sistema capaç de mantenir les seves característiques pròpies, perpetuar-se i evolucionar. Ara bé, aquest esquema simplificat planteja gairebé més preguntes que respostes. Quines molècules hauria tingut la sopa primitiva? Quines condicions de reacció (temperatura, pH, concentració...) serien necessàries per a què les molècules s'organit-

zessin fins al punt d'originar la vida? De quina escala de temps estem parlant? Com seria aquest primer sistema viu? I els seus precursors? És tan poc el que sabem de tot això, malgrat el nombre elevat de científics d'arreu que hi treballen i hi han treballat, que ja farem prou, en aquest article, de tractar de respondre amb un cert detall la qüestió més simple i cronològicament més llunyana: com es podria haver originat la sopa primitiva?

L'experiment de Miller i Urey

La idea de la sopa primitiva va ser proposada per primer cop, i de manera independent, per Oparin, el 1924, i Haldane, el 1929, però no va ser fins a l'any 1953 que aquesta idea va anar més enllà de l'especulació. En aquest any, Stanley Miller va dur a terme, en el laboratori, un experiment que li va valer la fama, a ell i al seu director de tesi doctoral, Harold Urey, guanyador del premi Nobel de química l'any 1934 per descobrir el deuteri. En aquest experiment històric, Miller hi va produir una sopa primitiva que contenia, entre d'altres molècules orgàniques, aminoàcids, quan va sotmetre una mescla d'hidrogen, metà, amoníac i aigua a descàrregues elèctriques, tot simulant l'efecte de les tempestes amb aparell elèctric a l'atmosfera reductora primitiva de la Terra. Les molècules orgàniques eren el resultat de la recombinació dels radicals creats a partir de les descàrregues elèctriques. En aquell moment, va semblar que si Miller i Urey eren capaços de sintetitzar aminoàcids en uns pocs dies, potser no era gaire difícil arribar a la vida en un període de temps més extens, diguem en milions d'anys. El problema de la sopa primitiva semblava solucionat. A poc a

poc, però, van anar apareixent arguments prou convincents com per dubtar de l'existència d'una atmosfera primitiva al nostre planeta com la que va simular Miller al seu experiment. Des de disciplines molt diferents, s'ha posat de manifest que, de la mateixa manera que els planetes veïns Venus i Mart, la Terra va perdre de seguida la seva atmosfera inicial i, molt abans d'originar-se la vida, l'atmosfera estava formada essencialment per diòxid de carboni, nitrogen i aigua, és a dir, pels gasos resultants de la desgasificació de l'interior del planeta. Quan hom prova de repetir l'experiment de Miller i Urey amb una atmosfera d'aquesta composició, però, no se n'obté cap sopa primitiva. Malgrat tot, el 1953 va ser clau per als estudis sobre l'origen de la vida, perquè per primer cop s'abordà l'estudi des d'un punt de vista experimental.



Meteorit caigut a Orgueil, França. Es tracta d'una condrita carbonàcia que conté centenars de molècules orgàniques sintetitzades a l'espai per diferents tipus de reaccions. L'exemplar de la fotografia té uns 15 cm de llarg.

valer el dubte de si les molècules orgàniques eren en realitat contaminació terrestre. L'any 1969, quan molts laboratoris d'arreu havien posat a punt nombroses tècniques d'anàlisi tot esperant l'arribada de les primeres roques lunars, va tenir lloc la caiguda, val a dir que molt oportuna, de centenars de quilograms de dues condrites carbonàcies a Murchison, Austràlia, i a Pueblito de Allende, Mèxic. Aquests meteorits eren plens de material orgànic sintetitzat

a l'espai, tal i com, d'una manera irrefutable, demostraren les anàlisis isotòpiques i les mescles racèmiques d'aminoàcids, per exemple. D'altra banda, en els cometes i les partícules de pols interplanetària d'origen cometari, malgrat no poder-se estudiar amb tant detall, atesa la llunyania d'uns i la menudesa de les altres, també s'hi han identificat nombroses molècules orgàniques, cap a una cinquantena.

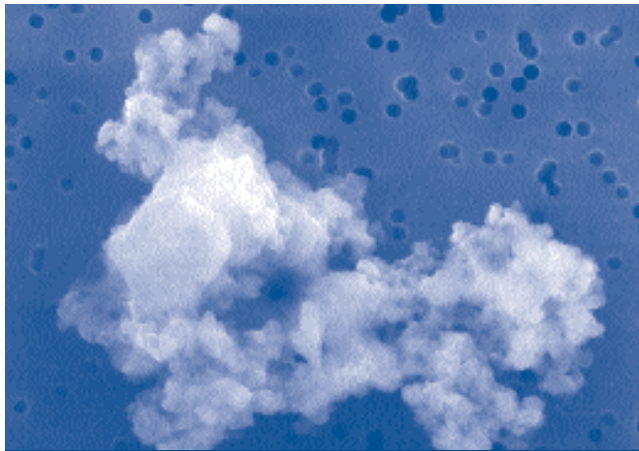
A dins o des de fora?

La Terra es veu assetjada de manera contínua per l'impacte de meteorits, cometes i pols interplanetària. Malgrat semblar exagerat, la veritat és que cada any el nostre planeta incorpora més de quaranta mil tones d'aquest material exogen, del qual la majoria són partícules de pols d'uns 10 µm de grandària. Gairebé tota la pols interplanetària prové de les cues de pols dels cometes. Des de la perspectiva de l'estudi de l'origen de la vida, tant els meteorits com els cometes i les partícules de pols interplanetària podrien haver tingut un paper determinant en la formació de la sopa primitiva. Hi ha un tipus de meteorits primitius, les anomenades condrites carbonàcies, que poden arribar a contenir al voltant del seu 5 % en pes en matèria orgànica. La major part d'aquesta (al voltant del 70 %) es troba en forma de polímers complexos de fórmula empírica aproximada $C_{76}H_{50}N_3O_{12}S_4$, però també s'hi ha identificat i caracteritzat més de sis-cents molècules orgàniques diferents: àcids carboxílics, aminoàcids, hidrocarburs, alcohols, amines, aldehids, cetones, purines, pirimidines, etc. L'existència de matèria orgànica en aquests meteorits ja va ser descrita per Berzelius, l'any 1834, i per Berthelot, el 1868, però va pre-

Arran dels estudis fets amb els cràters de la Lluna, sabem que tot just acabat de formar, el sistema Terra-Lluna va experimentar un gran nombre de col·lisions amb material cometari i meteorític. Si bé és cert que part del contingut orgànic dels cometes i meteorits pot destruir-se durant els impactes, les partícules de pols interplanetàries, molt més petites, se sedimenten a l'atmosfera d'una manera suau i en resulta la preservació del seu material orgànic. En total, s'estima que, des que es va formar la Terra fins a l'aparició de la vida, es varen dipositar, pel cap baix, uns 10^9 kg de material orgànic sobre la superfície del planeta. És possible, doncs, que la sopa primitiva pogués haver-se format, totalment o parcialment, a partir de material orgànic provinent de l'espai. De fet, Joan Oró ja va suggerir, el 1961, que, sota condicions favorables la vida podia haver-se format a partir de material orgànic originari de cometes. Si aquest fos el cas, hauriem de traslladar la qüestió de *com s'originà la sopa primitiva a com s'originà la matèria orgànica en cometes i meteorits*.

Un cresol estel·lar

Es creu que el nostre sistema solar es va formar pel col·lapse gravitatori d'una nebulosa de gas i pols motivat per l'explosió d'una supernova propera. Les supernoves són un tipus d'estrelles «madures» on les reaccions de fusió nuclear han anat transformant els protons creats en el Bing Bang en nuclis més pesats fins arribar al nucli més estable de la naturalesa, el Fe_{26} . Arran d'aquests processos de nucleosíntesi, s'arriba a una situació on l'energia alliberada en les reaccions de fusió no pot contrarestar el col·lapse gravitatori de l'estrella i en resulta la seva explosió violenta, que dona lloc a nuclis encara més pesats per processos de captura de neutrons, fins l' U_{92} . En l'explosió, la majoria dels nuclis són alliberats al medi interestel·lar, molt més fred, on atrauen electrons i formen els elements químics primer, que en combinar-se després donen lloc a molècules i sòlids refractaris anomenats grans interestel·lars. També en l'explosió, es crea una ona de xoc capaç de comprimir nebuloses de gas i la pols veïnes fins al punt que és possible la formació de noves estrelles. Aquestes, a més de contenir el gas i pols inicial de la nebulosa, també contenen part del material expel·lit per la supernova. Parlem, llavors, d'estrelles de segona, o n-generació. La nostra estrella, el Sol, conté tots els elements químics naturals de la taula periòdica, és un exemple d'estrella de n-generació amb una llarga història. Al mateix temps que es va formar el Sol pel col·lapse gravitatori d'una nebulosa, que anomenem nebulosa solar, va tenir lloc també la formació dels planetes i altres cossos al voltant d'aquest, com ara els cometes a la part més externa, i els asteroides, més propers a la Terra i d'on provenen gairebé tots els meteorits. Precisament en aquests, s'hi han trobat les pistes que han permès reconstruir, en part, el procés de formació del sistema solar. En les condrites carbonàcies, que amb edats de formació al voltant dels 4.600 milions d'anys són els meteorits més antics que coneixem i on —com ja hem vist— s'hi troba material orgànic en abundància, també hi ha grans interestel·lars de SiC , TiC , C (diamant, ful·lerens)... i



Imatge obtinguda per microscòpia electrònica de rastreig d'una partícula de pols interplanetària que prové d'un cometa. La partícula mesura uns 10 μm i va ser capturada a l'estratosfera. Aquestes partícules contenen material orgànic, però ateses les seves petites dimensions es desconeix quin tipus d'espècies hi són presents. Cada dia es disposen a la Terra unes 100 tones de pols interplanetària com aquesta.

en alguns components un excés en l'isòtop $^{26}\text{Mg}_{12}$ respecte a l'isòtop majoritari $^{24}\text{Mg}_{12}$. Les anomalies isotòpiques que s'observen en els gasos nobles atrapats en els grans interestel·lars constitueixen la prova irrefutable que demostren que aquests només poden provenir d'embolcalls d'estrelles. Per la seva banda, l'isòtop $^{26}\text{Mg}_{12}$ prové de la desintegració radioactiva de $^{26}\text{Al}_{13}$, però resulta que la vida mitjana d'aquest és de només uns 750 mil anys (la del $^{235}\text{U}_{92}$, per exemple, és d'uns 700 milions d'anys), de manera que

l'única possibilitat d'introduir $^{26}\text{Al}_{13}$ d'una manera ràpida en un meteorit és incorporant-lo directament d'una supernova.

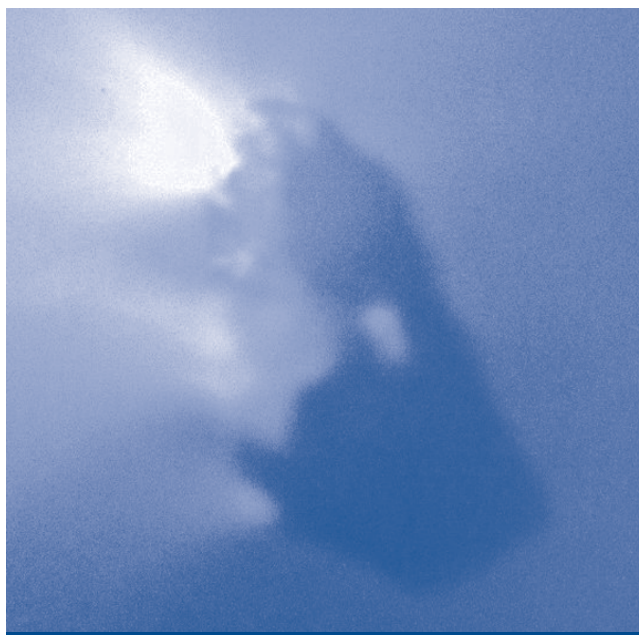
Des del punt de vista de l'estudi de l'origen de la vida i de l'existència de molècules orgàniques en cometes, meteorits i pols interplanetària, convé conèixer l'estat químic del carboni a la nebulosa solar. En un principi, tot el carboni del gas nebular estava en forma de monòxid de carboni; la resta del gas nebular estava dominat per hidrogen molecular i heli, amb petites quantitats d'altres molècules, com ara aigua, amoníac i sulfur d'hidrogen, a més del monòxid de carboni, en una proporció aproximada $\text{H}_2:\text{CO}:\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_3:\text{H}_2\text{S} \sim 10^3:1:1:0,25:0,05$. Aquests valors s'obtenen a partir de l'abundància dels elements químics en el Sol, ja que en aquest es concentra més del 99,9 % de la massa inicial de la nebulosa solar, i de l'estudi espectroscòpic d'altres nebuloses de la nostra galàxia. Després de l'explosió de la supernova, la nebulosa es va comprimir i va experimentar gradients tèrmics no isotròpics, de manera que mentre en el centre va començar la fusió nuclear de l'hidrogen i es va formar el Sol, en altres llocs la temperatura es va mantenir baixa. Segons es desprèn de les dades cristal·loquímiques de determinats minerals de les condrites carbonàcies, la pressió i temperatura en la zona de la nebulosa d'on es varen formar els cossos progenitors d'aquestes eren de l'ordre de 10^{-5} atm i 400-500 K. En aquestes condicions, varen poder tenir lloc reaccions en fase heterogènia entre els components del gas nebular sobre les partícules sòlides presents a la nebulosa que podrien haver actuat com a catalitzadors i originar així les

molècules orgàniques que hi ha, com a mínim, en les condrites carbonàcies. Ara bé, per poder entendre fins a quin punt les reaccions que es podrien haver donat en la nebulosa solar entre el gas i la pols nebulars podrien ser les responsables de la presència d'aquest material orgànic, cal precisar quina capacitat tenia la pols nebular per actuar com a catalitzador, i per això cal saber-ne la composició.

Catàlisi heterogènia a la nebulosa solar

La fase sòlida de la nebulosa solar estava constituïda fonamentalment per silicats i partícules metàl·liques. Un cop més, ho podem veure en determinats meteorits i partícules de pols cometària, on coexisteixen, lluny de l'equilibri químic, olivins i piroxens amb aliatges de ferro i níquel (normalment amb un 4-8 % de Ni). És ben sabut que en condicions favorables els metalls són catalitzadors excel·lents en reaccions on hi participa el monòxid de carboni i l'hidrogen. Ara, coneixent la composició de la fase gas de la nebulosa solar, els sòlids amb propietats catalítiques que hi eren presents, i les condicions de pressió i temperatura en la zona on es varen formar les condrites carbonàcies, estem en condicions de fer allò que tant agrada als químics: dur a terme reaccions al laboratori per a comprovar experimentalment que allò que preveiem té lloc a la realitat, tot i les simplificacions que normalment els experiments comporten.

Les primeres simulacions experimentals les va realitzar l'equip encapçalat per Edward Anders l'any 1968. A partir de mescles de H_2 i CO (proporció $H_2/CO = 1$), i en presència de diferents catalitzadors, com ara aliatges $FeNi$, Fe_3O_4 , montmorillonita, Al_2O_3 i SiO_2 , s'obtingueren, a pressions de 0,1 a 10 atm i temperatures de 423 a 773 K, moltes de les molècules orgàniques identificades en meteorits, en particular hidrocarburs. En incorporar NH_3 a la mescla de reacció, també se sintetitzaren bases nitrogenades, com l'adenina, la



Imatge del nucli del cometa Halley obtinguda l'any 1986 per la missió europea Giotto. El nucli del cometa, format essencialment per H_2O , CO , CO_2 , CH_3OH , CH_4 i silicats, es troba recobert d'un dipòsit fosc de naturalesa orgànica.

guanina i l'uracil. Anders designà totes aquestes reaccions com del «tipus Fischer-Tropsch», d'acord amb la ja coneguda síntesi catalítica d'hidrocarburs i compostos oxigenats que es du a terme a escala industrial a partir de CO i H_2 . De fet, la distribució d'isòmers i el creixement de cadena que s'observa en els hidrocarburs de les condrites carbonàcies és força similar a la que s'obté en la síntesi Fischer-Tropsch. El problema d'aquests estudis pioners era que s'utilitzaven mescles massa riques en CO i, sobretot, pressions i temperatures molt elevades comparades amb les predominants a la nebulosa solar. En els darrers

anys, però, ja s'han pogut realitzar estudis experimentals en condicions molt properes a les nebulars, excepte en l'escala temps, és clar. Així, treballant amb una proporció $H_2:CO = 250:1$, 5×10^{-4} atm de pressió, temperatures de 423-523 K i utilitzant com a catalitzador partícules d'aliatge $Fe_{95}Ni_5$, s'obtenen, després de mesos de reacció, hidrocarburs saturats i insaturats en l'interval C1-C5. La possibilitat d'enverinament de les partícules metàl·liques pel H_2S present al gas nebular també s'ha estudiat experimentalment, i s'ha vist que en condicions nebulars no només aquesta no té lloc sinó tot el contrari, el sofre té un efecte promotor en la reacció i a més es formen tiols. D'altra banda, un resultat important d'aquests estudis és que també s'ha observat la formació de dipòsits carbonosos amorfs sobre les partícules de catalitzador, de manera anàloga a com les fases metàl·liques de les partícules de pols interplanetària d'origen cometari es troben recobertes d'una fase carbonosa que també conté sofre, hidrogen i nitrogen. Malgrat tot, si bé ha quedat prou demostrat que a la nebulosa solar hi varen poder tenir lloc reaccions catalítiques en fase heterogènia que produïssin hidrocarburs i tiols, per exemple, no està, en canvi, gens clar que les reaccions del tipus Fischer-Tropsch fossin les responsables de la síntesi d'altres tipus de molècules presents a les condrites carbonàcies, com ara els aminoàcids, els àcids carboxílics i les amines. La situació real, com sempre passa quan s'intenta reconstruir el passat, és més complexa.

El trencaclosques final

Les anàlisis isotòpiques del material orgànic de les condrites carbonàcies indiquen que no totes les famílies de compostos tenen el mateix origen. El cas més extrem el constitueixen els àcids hidrocarboxílics i els aminoàcids, que presenten enriquiments en deuteri, $^{13}\text{C}_6$ i $^{15}\text{N}_7$, molt superiors a la resta de famílies de molècules presents. Els aminoàcids, per exemple, presenten valors d'enriquiment en deuteri de més de tres ordres de magnitud respecte als estàndards terrestres. L'únic lloc on es pot produir aquesta distribució isotòpica és l'espai interestel·lar, on les baixes temperatures (uns pocs kelvins) i els raigs còsmics fan possible reaccions químiques on els productes s'enriqueixen en l'isòtop més pesat. Això vol dir que part del material orgànic present en cometes i meteorits, o bé part dels seus precursors, té un origen interestel·lar anterior a la pròpia formació de la nebulosa solar, cosa que tampoc no ha de sorprendre, perquè des de l'any 1950 s'han identificat, mitjançant tècniques espectroscòpiques, prop d'un centenar d'espècies orgàniques lliures a l'espai.

Per embolicar-ho encara una mica més, hi ha nombroses evidències que tant les condrites carbonàcies com els cometes i les partícules de pols interplanetàries van experimentar processos d'alteració després de la seva formació. Aquests processos d'alteració secundaris varen ser suaus, per això es considera als cometes i les condrites carbonàcies com els materials més primitius del sistema solar, però varen ser capaços de donar lloc a la formació de silicats estructuralment més complexos, com ara els silicats en capes o filosilicats, perquè provocaren l'existència d'aigua líquida. Els filosilicats, per la seva banda, són catalitzadors excel·lents en reaccions de transformació de molècules orgàniques, de manera que, durant els processos d'alteració que tingueren lloc en cometes i en els cossos progenitors de les condrites carbonàcies, va poder tenir lloc la transformació del contingut orgànic d'aquests, que podria acabar donant, per exemple, el material orgànic de naturalesa polimèrica que en l'actualitat predomina en les condrites carbonàcies i partícules de pols interplanetàries.

Tot plegat indica que els mecanismes pels quals va tenir lloc la formació del material orgànic que arribà a la Terra abans de l'aparició de la vida a partir de la col·lisió de cometes, meteorits i pols interplanetària, es varen anar superposant els uns sobre els altres donant com a resultat un ventall

prou interessant d'espècies orgàniques. D'altra banda, però, aquesta complexitat de processos que tant ens costa d'entendre, per poder definir un conjunt de reaccions químiques i etapes elementals, potser és la que va conduir a la formació d'una sopa primitiva també prou complexa com per a possibilitar l'aparició de la vida al nostre planeta.

Cap on anem?

És obvi que encara fan falta moltes dades i simulacions experimentals com per a saber cap a quina direcció s'ha d'adreçar l'estudi de l'origen de la vida. Des d'una altra òptica, i en aquests moments, conèixer la composició real del component orgànic dels cometes constitueix un dels reptes més agosarats de les agències espacials. Amb aquest objectiu, l'agència espacial europea, ESA, ha dissenyat la missió Rosetta i la NASA, les missions Stardust i Deep Space 4. La missió europea Rosetta començarà el 2003 i es trobarà amb el cometa Wirtanen l'any 2012. En trobar-se amb el cometa, la missió Rosetta enviarà la sonda Champolion al seu nucli per agafar diverses mostres a diferents fondàries, les quals seran retornades a la Terra per a ser estudiades rigorosament. De la mateixa manera que Jean François Champolion va desxifrar l'alfabet jeroglífic egipci el 1822, gràcies a la pedra Rosetta, la missió que porta aquest nom ha de permetre conèixer quin és el contingut orgànic dels cometes amb el mateix detall que el coneixem en les condrites carbonàcies. La missió Stardust es va enlairar el febrer de 1999 i es trobarà amb el cometa Wild l'any 2004, a més de quatre-cents milions de quilòmetres de nosaltres. Quan l'enginyer es trobi a uns 100 km del cometa començarà un procés de captura suau de partícules de pols cometària per mitjà de l'ús d'un aerogel, el qual també serà retornat a la Terra per a ser analitzat acuradament. Per la seva banda, està previst que la missió Deep Space 4 visiti el cometa Tempel i retorni cap al 2010 uns 100 cm³ d'aquest. Quan les agències espacials parlen d'estudiar l'origen de la vida, no tot es redueix als cometes. L'any 2004 arribarà a Saturn la missió conjunta de l'ESA i la NASA, Cassini, després de set anys de viatge pel sistema solar, per observar de prop el planeta dels anells i enviar la sonda Huygens a la superfície de Tità, una lluna de Saturn que té oceans d'hidrocarburs i una atmosfera potser semblant a la de la Terra primitiva. Europa, una lluna de Júpiter coberta de gel, serà estudiada pròximament per la missió Galileu de la NASA, perquè hi ha indicis de poder trobar-hi aigua en estat líquid. Tots aquests

projectes aspiren a poder donar informació valuosa de com s'han format i organitzat les molècules orgàniques al sistema solar i, fins i tot, a localitzar algun dia un indici que demostrï que la Terra no és l'únic lloc on es poden trobar rastres presents o passats de vida. En aquest sentit, Mart també s'ha convertit en un objectiu important. Sabem taxativament que, en el moment d'aparèixer la vida a la Terra, a Mart també hi havia aigua líquida i una atmosfera semblant a la terrestre. Tot i que els indicis que es varen fer públics l'any 1996 sobre possibles bacteris fòssils al meteorit ALH 84001 (una roca formada a Mart fa uns 4.500 milions d'anys, arrencada fa uns quinze milions d'anys i que va aterrar a l'Antàrtida fa uns 13.000 anys) són dubtosos, hi ha previst el llançament d'una onada de naus automàtiques en els propers anys a aquest planeta veí.

TAULA Recull d'espècies orgàniques identificades en meteorits primitius.

Tipus de compost	Concentració aprox. (ppm)	Espècies identificades	Longitud de cadena	Exemples
Hidrocarburs alifàtics	35	210	C ₁ -C ₃₀	Propà, isobutà...
Hidrocarburs aromàtics	21	87	C ₆ -C ₂₀	Pirè, fenantrè, acenaftè...
Alcohols	11	8	C ₁ -C ₄	Etanol, metanol, propanol...
Aldehids i cetones	27	9	C ₁ -C ₅	Dimetilcetona, formaldehid.
Àcids carboxílics	330	63	C ₁ -C ₁₂	Àcid acètic, àcid valèric...
Àcids hidroxicarboxílics	15	101	C ₂ -C ₈	Àcid làctic, àc. α-hidroxi-glutàric...
Amines	8	10	C ₁ -C ₄	Metilamina, propilamina...
Amides	62	4	C ₁ -C ₃	Urea, guanilurea, fenilurea...
Aminoàcids	60	78	C ₂ -C ₉	Glicina, àcid α-aminoisobutíric...
Purines i pirimidines	2	5	C ₄ -C ₅	Adenina, xantina, guanina, uracil...
Altres heterocicles	7	38	C ₅ -C ₁₀	Dibenzotiofè, quinolina...
Àc. sulfònics i fosfònics	5	12	C ₁ -C ₄	Àc. metilsulfònic, àc. etilfosfònic...
Polimers	>2300	-	C _{>100}	C ₁₀₀ H ₄₈₋₇₁ N _{1,8-2} O ₁₂ S ₂ (Murchison)...
Total	>2800	625		

Bibliografia

- CRONIN, J. R., PIZZARELLO, S., i CRUIKSHANK, D. P., «Organic matter in carbonaceous chondrites, planetary satellites, asteroids and comets», *Meteorites and the Early Solar System*, 1a ed., The University of Arizona Press, Tucson, 1988, p. 819-857.
- GREENBERG, J. M., *The Chemistry of Life's Origins*, 1a ed., Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1993.
- HAYATSU, R. i ANDERS, E., «Organic compounds in meteorites and their origins», *Topics in Current Chemistry*, 99 (1981), p. 1.
- HERBST, E., The chemistry of interstellar space, *Angewandte Chemie Int. Ed. Engl.*, 29 (1990), p. 595.
- LLORCA, J., *Els meteorits: Què són i per a què serveixen?*, 1a ed., Publ. Institut d'Estudis Ilerdencs, Lleida, 1995.
- MASON, S. F., *Chemical evolution. Origin of the elements, molecules and living systems*, 1a ed., Oxford University Press, Oxford, 1991.
- WILLIAMS, R. J. P. i FRAÚSTO DA SILVA, J. J. R., *The Natural Selection of the Chemical Elements*, 1a ed., Clarendon Press, Oxford, 1996.

Autor

Jordi Llorca és, des de 1992, membre de l'equip de professors i personal investigador del Departament de Química Inorgànica de la Universitat de Barcelona, on es doctorà l'any 1995. Guanyador del premi per a estudiants de la Societat Catalana de Química (IEC) l'any 1990, ha estat becari de la CEE a l'Institut de Ciència de Materials de Barcelona (CSIC), research assistant a l'Institut de Meteorits (Universitat de Nou Mèxic), a Albuquerque (Estats Units), i ha realitzat diferents estades d'estudi i recerca a l'Institut de Recerca sobre la Catàlisi (CNRS), a Villeurbanne (França), i al Departament de Ciència i Tecnologia Química (Universitat d'Udine), a Itàlia. Actualment, concentra la seva tasca en la síntesi, caracterització i aplicació de nous materials en processos catalítics en fase heterogènia.