

# MOLÈCULES ORGÀNIQUES A L'ESPAI INTERSTEL·LAR

per JOAN ORÓ

## 1. INTRODUCCIÓ

Primerament he de donar les gràcies als doctors Josep Trueta i Pere Babot, president i secretari general, respectivament, de la Societat Catalana de Biologia, i al doctor Antoni Prevosti, pel fet d'haver-me invitat a participar en aquest col·loqui sobre l'evolució i oferir-me l'oportunitat de parlar-vos, encara que sigui breument, de les troballes recents de l'astro-nomia molecular que han causat una revolució en els nostres coneixements de la composició de l'espai interstel·lar.

En segon lloc us he de confessar que aquesta és la primera vegada que em dirigeixo a una audiència d'amics i col·legues científics de la nostra terra en la pròpia llengua materna, sens dubte rovellada pels vint anys de la meua estada a l'Amèrica del Nord. Espero, per tant, que em perdo-nareu per la meua deficiència idiomàtica, que bé sé que restarà sobradament compensada per la vostra comprensió i generositat.

Finalment desitjo de felicitar els organitzadors d'aquest col·loqui per l'encert que han tingut en escollir i programar el tema de l'evolució en el sentit modern i més ampli de la paraula, és a dir, incloent d'una forma integrada no sols l'evolució biològica sinó també l'evolució físico-química que probablement va precedir-la, i la humana que indubtablement l'ha succeïda. I encara que hi hagi elements hipotètics més o menys especulati-us en la teoria de l'evolució global de la natura, considero que aquest és l'únic enfocament del procés cognoscitiu que intenta d'oferir una unifi-cació dels diversos coneixements humans i presentar una síntesi històrica dels fenòmens naturals en l'espai i en el temps.

La meua contribució dins l'aspecte físico-químic del procés evolutiu restarà limitada majorment a la presentació dels descobriments que han estat fets principalment per la radioastronomia, de molècules orgàniques, inorgàniques i d'altres espècies químiques que existeixen entremig dels estels de la nostra galàxia; i a la possible significació que aquests descobri-

ments puguin tenir per a la teoria de l'evolució química orgànica que hom suposa que va precedir la biològica ací a la Terra.

## 2. HI HA UNA COSMOQUÍMICA ORGÀNICA?

L'anàlisi de les mostres de la Lluna, obtinguda pel projecte nord-americà «Apollo» i pel soviètic «Lluna», ha demostrat que la composició química del nostre satèl·lit és essencialment inorgànica i bastant semblant a la composició de la crosta de la Terra. És a dir, els sis elements predominants són O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, normalment combinats en la forma de silicats, i amb un percentatge de carboni que rarament excedeix les 300 ppm o el 0,03 per cent.

Ara bé, si hom mira més enllà envers els estels i n'analitza espectroscòpicament la llum, hom s'adona que la composició elemental química de l'univers observable és molt diferent. De fet les compilacions d'abundàncies d'elements químics demostren que, amb l'excepció de dos gasos nobles (He, Ne), els elements més abundants a l'univers són l'hidrogen, el carboni, l'oxigen i el nitrogen, que són precisament els quatre majors elements constitutius de la matèria orgànica.

Ens trobem, doncs, davant una aparent paradoxa que pot ésser expressada de la forma següent: la matèria viva és una mostra més representativa de l'univers que la matèria inerta de la Terra, la Lluna i probablement els altres planetes petits del sistema solar.

Com es pot explicar aquesta paradoxa? En part considerant el sistema com un cromatograma circular gegantí (gas-sòlid) i reconeixent que la part central d'aquest sistema, que és ocupada pels planetes terrestres i els asteroïdes, fou probablement minvada dels elements químics lleugers per la calor radiant i per l'hidrogen i l'heli actuant com a gasos de transport dimanant contínuament del sòl primitiu. Així els elements lleugers foren desplaçats cap a la regió externa del sistema solar on es troben els grans planetes jovians (i els cometes). Per tant, com que la massa dels planetes jovians és més del 99,5 % de la massa planetària total del sistema solar, i com que aquests planetes són fets d'heli i d'elements reactius lleugers (H, C, N, O, etc.), podem concloure que la química d'aquests elements, que és en part química orgànica, és la química predominant del sistema planetari solar. Això vol dir, doncs, que els planetes terrestres que formen part de la petita zona interna del sistema solar són en realitat l'anomalia que confirma la regla. A més, és possible que aquest no sigui un cas únic, i que aquesta composició elemental anòmala sigui observada, en general, a les zones circumdants dels estels on la temperatura sigui relativament alta i la força gravitatòria dels cossos existents en aquestes zones sigui rela-

tivament baixa; condicions que donen lloc automàticament a la difusió i pèrdua dels elements químics lleugers.

D'altra banda, i com a conseqüència lògica de l'abundància dels elements lleugers en els estels, hom podria concloure que la química predominant de l'univers més enllà del sistema solar ha d'ésser també la química orgànica. Aquest punt de vista el vaig expressar ara fa uns deu anys quan tingué lloc a Nova York, amb el patrocini de l'Acadèmia de Ciències d'aquella ciutat, una reunió científica semblant a la que avui se celebra ací, a Barcelona. En aquell treball (ORÓ, 1963)<sup>13</sup> hom parlava per primera vegada de la cosmoquímica orgànica i hom presentava el concepte, basat en part en la recerca feta al nostre laboratori, que la química més prevalent a l'univers havia d'ésser forçosament la química dels elements lleugers, especialment aquells que jo havia anomenat organogènics (H, C, O, N, S, P). També deia que les combinacions més importants que s'haurien de formar a partir d'aquests elements serien molècules orgàniques relativament senzilles, precursoras en el laboratori de molècules biològiques més complexes. De fet, en aquells temps encara continuava existint la paradoxa entre la gran abundància còsmica dels elements lleugers (H, C, O, N, etc.) i la manca d'observacions de molècules orgàniques a l'espai interstellar.

Sortosament, en aquests darrers tres anys ha estat resolta aquesta paradoxa gràcies al desenvolupament de l'espectroscòpia de microones i la seva aplicació a la radioastronomia fent possible el descobriment de radicals i de molècules, la major part d'elles orgàniques, en les vastes regions de la nostra galàxia. Aquestes observacions han estat confirmades i generalitzades, amb la qual cosa ha restat demostrada la hipòtesi de l'existència, i de la universalitat, de la cosmoquímica orgànica.

Estem ara, per tant, en millors condicions per a poder comprendre la distribució còsmica i la formació de les molècules dels elements organogènics (H, C, O, N, S, P) que són els elements essencials o més importants per a l'existència de la vida a la Terra. Els problemes fonamentals de la cosmoquímica orgànica són: 1) quines molècules orgàniques i organogèniques existeixen en la nostra galàxia i en el nostre sistema solar; 2) quina és llur distribució en les distintes parts d'aquests dos sistemes; 3) com foren sintetitzades o com es produeixen avui dia aquestes molècules, i, finalment, 4) quina relació poden tenir amb l'evolució química pre-biològica i amb l'existència de la vida terrestre i extraterrestre.

És obvi que amb el poc temps de què hom disposa no podem fer un tractament just de tots aquests problemes, i per tant només intentaré de presentar un breu resum dels aspectes més interessants, deixant de banda el tractament de les molècules orgàniques en el sistema solar. Hom pot trobar discussions més àmplies d'aquestes qüestions fonamentals en un article

recent de l'autor i en altres articles allí esmentats (ORÓ, 1972)<sup>17</sup>; i discussions tècniques de les troballes fetes per la radioastronomia poden ésser trobades en altres articles (per exemple: BUHL, 1971<sup>2</sup>; BUHL i SNYDER, 1971<sup>3</sup>; RANK *et al.*, 1971<sup>18</sup>).

### 3. L'ESPAI I LA MATÈRIA INTERSTEL·LAR

La matèria interstel·lar ha estat definida en el passat com «el fantasma que persegua els astrònoms». Això fou causat en part per la falta de coneixements quant a la seva composició química, malgrat el fet que hom havia calculat que la massa total d'aquesta matèria era comparable a la massa conjunta de tots els estels.

Bé que no hi hagi definicions precises de tot el que hom comprèn sota el nom de matèria interstel·lar, hom hi ha d'incloure almenys, a part dels raigs còsmics, a) les nebuloses, b) les bromes interstel·lars, i c) les bromes circumstel·lars. Cada una d'aquestes formacions pot tenir, en quantitat més o menys variable, components gasosos o sòlids. Més endavant, quan parlarem de les troballes recents de molècules orgàniques, ens referirem principalment a les bromes gasoses interstel·lars.

### 4. ASTRONOMIA ÒPTICA: ÀTOMS I COMBINACIONS DIATÒMIQUES

L'aplicació de l'espectroscòpia òptica a la determinació dels elements que es troben a l'espai interstel·lar comença amb el descobriment de la línia espectral d'absorció del calci ( $\lambda 3934 \text{ \AA}$ ) feta per HARTMANN l'any 1904. Des d'aleshores els elements que han estat identificats a l'espai interstel·lar són principalment els següents: hidrogen, heli, carboni, oxigen, nitrogen, fluor, neó, sofre, clor, argó, sodi, potassi, manganès, ferro i titani, que com podem veure inclouen cinc dels sis elements organogènics. Les intensitats espectrals d'aquests elements són semblants a les intensitats dels elements que es troben pròpiament en els estels (MERRILL, 1963)<sup>8</sup>, la qual cosa indica que els estels són probablement les fonts d'origen dels elements interstel·lars.

Les primeres combinacions diatòmiques, d'interès per al químic orgànic, detectades a l'espai interstel·lar per l'espectroscòpia òptica, foren el radical cianogen (CN), el radical metilidè (CH), i l'ió radical metilidè (CH<sup>+</sup>). Les línies d'absorció d'aquests radicals (de 3745 a 4300 Å), que corresponen a nivells electrònics amb zero o un *quantum* d'energia rotacional, foren descobertes per DUNHAM i ADAMS des del 1937 fins al 1941 (ADAMS, 1943)<sup>7</sup>. L'any 1934, MERRILL descobrí una sèrie de bandes difuses

d'absorció (entre 4310 i 6700 Å) que encara no han pogut ésser identificades, bé que no hi manquen suggeriments més o menys especulatius. Per exemple, una hipòtesi considera que algunes d'aquestes bandes, particularment la de 4430 Å, són produïdes per complexos de metalls i hidrocarburs aromàtics, mentre que una hipòtesi molt més aventurada considera que la major part d'aquestes bandes són generades per una porfirina especial (la bispiridil-magnesi-tetrabenzoporfina,  $MgC_{46}H_{30}N_8$ ) que és estable a temperatures de 500 a 600 °C, que té una energia de ressonància de 400 kcal/mol i una energia de dissociació de 17 e.v. Altres autors més conservadors hi han involucrat les petites partícules sòlides, més o menys complexes, que constitueixen els grans interstellars i que no puc discutir ací per la limitació d'aquest treball. A part aquestes observacions, de radicals d'un costat i de bandes d'absorció d'un altre, l'única molècula pròpiament dita que ha estat identificada inequívocament a l'espai interstellar per l'espectroscòpia òptica ha estat la d'hidrogen ( $H_2$ ), descobriment fet recentment mitjançant una màquina fotogràfica sensitiva a l'ultraviolat acoblada a un coet estratosfèric (CARRUTHERS, 1970) <sup>4</sup>. Amb l'excepció d'aquesta darrera troballa, les limitacions de l'astronomia òptica han estat tan grans que durant els últims trenta anys no ha pogut afegir res de nou, definitiu, al coneixement de la composició química de la matèria interstellar.

## 5. RADIOASTRONOMIA: ÀTOMS I MOLÈCULES

Després de les troballes inicials de les ones de ràdio provinents de la Via Làctia per JANSKY i REBER, des de l'any 1928 al 1942, i del perfeccionament de la tecnologia del radar durant la segona guerra mundial, l'astronomia adquirí dos mètodes d'observació nous: un actiu, l'astronomia de radar, i l'altre més o menys passiu, la radioastronomia. Tots dos fan ús de la regió electromagnètica de l'espectre ocupada per les ones de ràdio aproximadament d'1 mm a 30 m; però, mentre que pel primer mètode hom mesura les distàncies i l'estructura superficial de la Lluna i dels planetes més pròxims a la terra, enviant i rebent de rebot les ones de ràdio, pel segon mètode hom recull totes aquelles ones de ràdio que són produïdes pels cossos celests, tant si es troben relativament a prop (planeta Júpiter) com lluny (pulsars, nebuloses, etc.).

El primer descobriment important de la radioastronomia fou el de la línia d'emissió de 21 cm de l'hidrogen atòmic de l'espai interstellar fet per EWEN i PURCELL l'any 1951 (EWEN, 1955) <sup>7</sup>. Això permeté de fer un mapa de les bromes gegantines d'hidrogen atòmic que formen els braços espirals de la Via Làctia i determinen la major part, fins aleshores desconeguda, de l'estructura de la nostra galàxia. Als pocs anys d'aquest des-

cobriment, l'astrofísic rus SHKLOVSKY i el físic nord-americà TOWNES suggeriren la recerca a l'espai interstel·lar de molècules pròpiament dites i presentaren els principis fonamentals de l'espectroscòpia de microones (TOWNES i SCHAWLOW, 1955)<sup>22</sup>.

Ara bé, els problemes pràctics de construcció d'antenes receptores foren tan grans, que els descobriments realment importants no s'esdevingueren fins bastants anys més tard. Així, l'any 1963, WEINREB *et al.* (1963)<sup>25</sup> observaren les línies de 18 cm d'emissió del radical hidroxil, en una regió prop del centre de la galàxia, amb el radiotelescopi del laboratori Lincoln del M. I. T. A la tardor del 1968 i a la primavera del 1969, les dues primeres molècules, l'amoníac i l'aigua, foren descobertes a l'espai interstel·lar pel grup dirigit per TOWNES (CHEUNG *et al.*, 1968, 1969)<sup>5, 8</sup>, amb el petit radiotelescopi, a Hat Creek, de la Universitat de Califòrnia (Berkeley). Les línies d'emissió d'aquestes dues molècules són 1,26 cm i 1,35 cm, respectivament.

Pel març de 1969 la línia de 6,2 cm d'absorció del formaldehid fou observada per SNYDER *et al.* (1969)<sup>20</sup> amb l'ara famós radiotelescopi de l'Observatori Nacional de Radioastronomia dels Estats Units (NRAO), situat a Green Bank, West Virginia (figura 1). Aquest fou el primer descobriment d'una molècula orgànica (és a dir, no d'un radical o d'un ió radical) a l'espai interstel·lar. Les troballes d'aquestes tres molècules, l'amoníac, l'aigua i el formaldehid, representen el començament del desenvolupament vertiginós que tingué la radioastronomia molecular durant els anys 1969-1971.

El formaldehid fou trobat primer en un lloc no molt llunyà del centre galàctic, i des d'aleshores ha estat trobat en moltes altres regions de la galàxia. Hom creu que és un constituent comú, juntament amb l'hidrogen i l'hidroxil, de moltes de les bromes de la Via Làctia.

L'abril de 1970, WILSON, JEFFERTS i PENZIAS (1970)<sup>26</sup> trobaren les línies d'emissió (2,6 cm) del monòxid de carboni a la nebulosa Orió i en unes altres vuit regions de la galàxia, indicant que també és una molècula de distribució molt general. Normalment aquesta molècula ocupa la part central de les bromes de formaldehid, la qual cosa podria indicar una relació genètica entre aquestes dues molècules, és a dir, que el formaldehid —probablement— es forma per hidrogenació del monòxid de carboni. Els mateixos autors detectaren en la mencionada nebulosa el radical cianogen, l'existència del qual ja era coneguda per l'espectroscòpia òptica.

Pel juny de l'any 1970, SNYDER i BUHL (1971)<sup>19</sup> trobaren línies d'emissió corresponents al cianur d'hidrogen amb carboni 12 i al cianur d'hidrogen amb carboni 13, també a la nebulosa Orió. La figura 3 mostra els espectres d'emissió d'aquestes dues molècules juntament amb una altra

molècula isoelectrònica de l'HCN, que hom creu que és el radical formil (HCO) i que ha estat anomenat provisionalment X-ogen. Les observacions de les espècies químiques CO, CN i HCN foren fetes amb el petit radiotelescopi que el NRAO té a Kitt Peak, Arizona.

La nebulosa Orió (figura 2) és una de les regions de l'espai interstellar més interessants. És aproximadament a 1.500 anys de llum de la Terra i té un diàmetre d'uns 10 anys de llum: és una nebulosa de pols i gas que, a més del cianur d'hidrogen i del monòxid de carboni, té bromes de formaldehid, radical cianogen, aigua, radical hidroxil, monosulfur de carboni i alcohol metílic.

Pel juliol del mateix any, TURNER (1970)<sup>23</sup> observà amb el telescopi gran del NRAO l'espectre d'emissió corresponent al cianacetilè (HC<sub>2</sub>N). Aquesta és una de les molècules orgàniques més complicades descobertes per la radioastronomia a l'espai interstellar. Fou trobada en una regió prop del centre de la galàxia, on han estat observats també OH, CO, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, HCHO, tioformaldehid, formamida i àcid fòrmic.

Les observacions de molècules interstellars s'han succeït amb tanta celeritat que en uns tres anys han estat descobertes més d'una vintena de molècules noves (taula 1). Com podem veure en la taula 1, amb l'excepció de l'amoniac, l'aigua, l'hidrogen i l'òxid de silici, totes les altres molècules són orgàniques. També hom veu que la major part dels descobriments han estat fets amb els radiotelescopis petit (36 peus) i gran (140 peus) de l'Observatori Nacional de Radioastronomia (NRAO) dels Estats Units, per investigadors pertanyents a universitats i laboratoris nord-americans.

## 6. CARACTERÍSTIQUES DE LA MATÈRIA INTERSTEL·LAR

A causa del gran buit de l'espai còsmic, la matèria interstellar ocorre solament en dos estats, el sòlid i el gasós, que es presenten respectivament en la forma de bromes de pols i de bromes de gas, entre les quals hom observa unes certes correlacions. Les bromes de pols són constituïdes per grans interstellars d'un diàmetre mitjà de 0,1 micròmetres, d'una densitat mitjana de  $10^{-12}$  respecte a l'hidrogen i que tenen una temperatura aproximada de 10 °K. Hi ha diverses hipòtesis quant a llur composició. Una de les més acceptades considera que els grans són fets principalment de partícules de silicats i de grafit amb certes impureses inorgàniques (metalls) i orgàniques (polímers).

Les bromes de gas són constituïdes per les molècules que acabem de descriure en la secció anterior. Aquestes bromes ocupen aproximadament el 10 % del volum de la nostra galàxia, i com podíem esperar, les diferències individuals entre elles són molt grans. Així els diàmetres d'aques-

tes bromes varien aproximadament des de  $10^{-2}$  fins a  $10^2$  anys de llum, la densitat total del gas des de 10 fins a  $10^6$  partícules gasoses/cm<sup>3</sup>, i l'hidrogen neutre (H, H<sub>2</sub>) n'és el major constituent. La densitat de les molècules orgàniques és normalment una fracció petita de la de l'hidrogen, i la densitat total de l'espai entre les bromes interstellars és de l'ordre de 0,1 partícules/cm<sup>3</sup>. Les velocitats de desplaçament d'aquestes bromes varien entre zero i unes desenes de quilòmetres per segon. Aquestes velocitats són mesurades mitjançant el desplaçament de les freqüències d'absorció o d'emissió d'acord amb l'efecte Doppler Fizeau. Les temperatures normals oscil·len entre 10° i 200° K, bé que hi ha bromes com les de formaldehid que han estat observades amb línies d'absorció a temperatures de l'ordre de 3° K, que corresponen a la temperatura de la radiació de fons de l'univers. Aquesta observació és d'interès, puix que indica que les transicions rotacionals del formaldehid poden absorbir la radiació més feble de l'univers.

Una altra observació excepcional d'un fenomen totalment distint és el de certes línies d'emissió del radical hidroxil i de l'aigua. Hom ha calculat que l'energia emesa per algunes d'aquestes bromes interstellars és equivalent a una desena part de l'energia emesa pel sol, és a dir  $10^{32}$  ergs/segon. Hom creu que això és degut a l'existència d'un mecanisme d'amplificació del procés d'emissió de radiació semblant al mecanisme *Maser* (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) descobert per TOWNES. L'emissió contínua d'unes quantitats tan grans d'energia ha de donar lloc automàticament al refredament ràpid de l'hidrogen (atòmic i molecular) i altres components moleculars de la broma o nebulosa, causant a poc a poc llur condensació total. Hom creu que aquesta pot ésser la fase inicial de formació dels sistemes estel·lars (i planetaris), els quals eventualment es materialitzen gràcies al col·lapse gravitacional que ocorre quan la massa del sistema esdevé crítica i és suficient per a iniciar les reaccions termonuclears.

## 7. ORIGEN DE LES MOLÈCULES INTERSTEL·LARS

Poc se sap de ciència certa de l'origen i la formació d'aquestes molècules. En general, la concentració d'aquestes molècules augmenta a mesura que ens atensem al centre de la galàxia, la qual cosa indica que aquesta zona de gran activitat còsmica (incloent-hi la termonuclear) és una de les fonts principals de matèria interstellar. Altres llocs importants són les nebuloses fosques —com la nebulosa Orió, que conté un gran nombre de grans interstellars—, que actuen com a protectors de les molècules en contra dels efectes destructius de les radiacions ionitzants i ultraviolades. Hi ha també regions prop de les *novae*, de les *supernovae* i de les nebuloses,



on han estat trobades concentracions importants de línies espectrals corresponents a molècules o radicals (CO, CN, etc.). Aquestes observacions, juntament amb el fet que hi ha una correlació entre les proporcions relatives dels elements interstellars i els elements estel·lars, donen una indicació forta que les fonts últimes dels elements i les molècules interstellars són els estels i aquelles regions còsmiques actives com és ara el centre de la galàxia.

La formació còsmica de les molècules interstellars pot explicar-se de la manera següent: un cop els elements s'han format en el nucli dels estels per reaccions termonuclears, es difonen normalment vers les atmosferes estel·lars, on reaccionen mútuament i formen radicals i combinacions senzilles, diatòmiques ( $H_2$ , CO, CN,  $C_2$ , CH, OH, NH, etc.) i triatòmiques ( $H_2O$ ,  $C_3$ ), que estan en equilibri amb els àtoms respectius. Ara bé, aquests àtoms i aquestes combinacions senzilles són llançades a l'espai interstellar per fenòmens més o menys violents que s'esdevenen de tant en tant en els estels. Aquests fenòmens varien en intensitat des de les explosions de les *supernovae* i les *novae* a les pulsacions periòdiques dels estels variables, i als processos relativament suaus d'ejecció de matèria estel·lar, com són les flamarades solars i els vents corpusculars. Un cop a l'espai interstellar, la supervivència o vida mitjana d'aquestes combinacions dependrà de llur estabilitat tèrmica, del flux radiant existent, de la densitat de partícules sòlides que les protegeixen i de la interacció amb altres espècies químiques.

A causa de la predominança de l'hidrogen, particularment en la forma activa, la major part d'aquestes combinacions simples seran hidrogenades bastant de pressa, i produiran, a més de l'aigua i de l'amoníac, les molècules orgàniques més abundants que ja hem descrit (HCN, HCO, HCOH,  $HC_3N$ , etc.). La interacció subsegüent amb diferents radicals, particularment l'hidroxil, pot explicar la formació de totes les altres molècules orgàniques que han estat descobertes fins ara. Mesures còsmiques de les combinacions orgàniques més importants i de l'abundància relativa de certs isòtops (e. g. carboni 13 i carboni 14) són consistents amb aquesta hipòtesi de formació de molècules orgàniques interstellars que presento amb més detall en un altre article (ORÓ, 1972)<sup>17</sup>. No hi ha dubte que els grans interstellars podran actuar com a catalitzadors i modificadors de la síntesi d'aquestes molècules, augmentant llur varietat i donant lloc a la formació de compostos encara més complexos.

## 8. IMPORTÀNCIA D'AQUESTES TROBALLE ENVERS LA SÍNTESI PRE-BIOLÒGICA ORGÀNICA

El nostre coneixement de la formació de molècules interstellars i de l'evolució de les bromes gasoses interstellars és tan imperfecte que seria prematur de fer ulteriors generalitzacions sobre la importància d'aquestes troballes envers la síntesi pre-biològica orgànica. Les condicions de les bromes interstellars i dels planetes (i també dels laboratoris de què disposem ací a la terra), són tan diferents que és impossible de fer una comparació directa entre elles. Deixant a part les diferències dràstiques de les condicions de temperatura i flux de radiació, es requiriria encara una extrapolació, quant a la concentració, de 20 ordres de magnitud com a mínim.

Si hom suposa que la nostra nebulosa solar fou originada per la condensació de bromes moleculars i de pols, semblants a les interstellars, és obvi que la sobrevivència de molècules orgàniques hauria depès de les condicions de condensació i de la subseqüent acreció de la nebulosa. Si la transició de les bromes interstellars a la matèria de la nebulosa solar i del sistema planetari primitiu ocorregué a temperatures relativament baixes, és lògic de pensar que algunes de les molècules interstellars s'haurien conservat tal qual, mentre que d'altres d'aquestes haurien donat lloc, per reacció mútua, a la síntesi de molècules orgàniques d'una major complexitat. És possible que aquest hagi estat el cas de la matèria dels cometes i d'alguns dels meteorits condrítics carbonacis. Per tant és concebible que els hidrocarburs i els aminoàcids que han estat trobats en aquests meteorits (que tenen uns 4.500 milions d'anys) hagin estat formats d'aquesta manera. El doctor GIBERT us parlarà amb més detall d'aquestes troballes.

Si, d'altra banda, les transicions esmentades ocorregueren a temperatures altes, poques molècules s'haurien conservat intactes. Aquest fou possiblement el cas de l'organosfera terrestre durant la formació del nostre planeta.

Hom creu que l'energia (gravitacional, radioactiva, etc.) disponible o generada durant el procés d'acreció i formació d'un planeta de les dimensions i la posició de la Terra és suficient per a volatilitzar, pirolitzar i transformar la major part de les molècules orgàniques primàries que hi hagin estat presents. No obstant això, com que les molècules heteroatòmiques produïdes per piròlisi són generalment molt reactives, no hi ha dubte que es devia repetir de nou el cicle de síntesi orgànica en l'organosfera terrestre, és a dir, en la atmosfera secundària, la hidrosfera i la

superfície de la Terra en acabar de formar-se el nostre planeta. En refredar-se la superfície de la Terra a temperatures més baixes ( $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) hom creu que aquesta organosfera, mitjançant processos d'evolució química bastant complicats, es convertí a poc a poc, ara fa uns 3.500 a 4.000 milions d'anys, en la biosfera primitiva de la Terra.

Ara bé, ¿quins són aquests processos d'evolució química i quines són les molècules que hi són involucrades? Els resultats dels treballs experimentals de síntesi abiòtica orgànica fets durant els darrers vint anys pels investigadors que estudien el problema de l'origen de la vida permeten d'endevinar-ho. És a dir, es dona la coincidència, probablement no fortuïta, que la major part de les molècules trobades a l'espai són les que hom havia trobat o usat en el laboratori en experiments de síntesi orgànica. De fet les deu molècules interstellars, possiblement més importants ( $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCHO}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CS}$ ,  $\text{HCONH}_2$ ,  $\text{HC}_2\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{CHO}$ ) són també les molècules precursoras més importants per a la formació abiòtica d'aminoàcids, purines, pirimidines, monosacàrids i altres compostos bioquímics.

Amb l'addició del fosfat que encara no ha estat detectat a l'espai interstelar, la llista de precursors dels blocs de formació dels àcids nucleics, proteïnes, sacàrids i lípids restaria essencialment completa.

Tres de les deu molècules esmentades abans (l'hidrogen, l'aigua i l'amoniac) donen una indicació de la natura reductora, aquosa i bàsica del medi ambient que predominaria en els cossos còsmics provinents de la condensació d'aquestes molècules interstellars. Aquestes condicions del medi ambient, reductor (o no oxidant), aquós i bàsic, han estat postulades per OPARIN (1938)<sup>10</sup> i UREY (1952)<sup>24</sup> com a necessàries per a la síntesi pre-biològica de compostos bioquímics a la Terra primitiva, tal com demostraren MILLER (1955)<sup>9</sup> en la síntesi d'aminoàcids, i ORÓ (1960)<sup>11</sup> en la síntesi de purines.

La taula 2 dona un breu resum de les reaccions de síntesi abiòtica orgànica més importants, estudiades fins ara (ORÓ<sup>11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 1960-1972</sup>; STEPHEN-SHERWOOD i ORÓ, 1972<sup>21</sup>). Hom hi pot veure la participació de molècules idèntiques a les trobades a l'espai interstelar.

En conclusió, del descobriment de les noves molècules (orgàniques i inorgàniques) a l'espai interstelar, hom pot dir que:

- 1) Ofereix una de les primeres solucions al problema de la condensació de la matèria mitjançant un mecanisme tipus *Maser* (bromes de  $\text{H}_2\text{O}$  i  $\text{OH}$ ) necessari per a entendre la formació de nous estels i de nous sistemes planetaris.
- 2) Ha eliminat la paradoxa existent entre la composició elemental i la composició molecular de l'univers.
- 3) Ha resultat la troballa de l'anella perduda en la cadena de l'evolució.

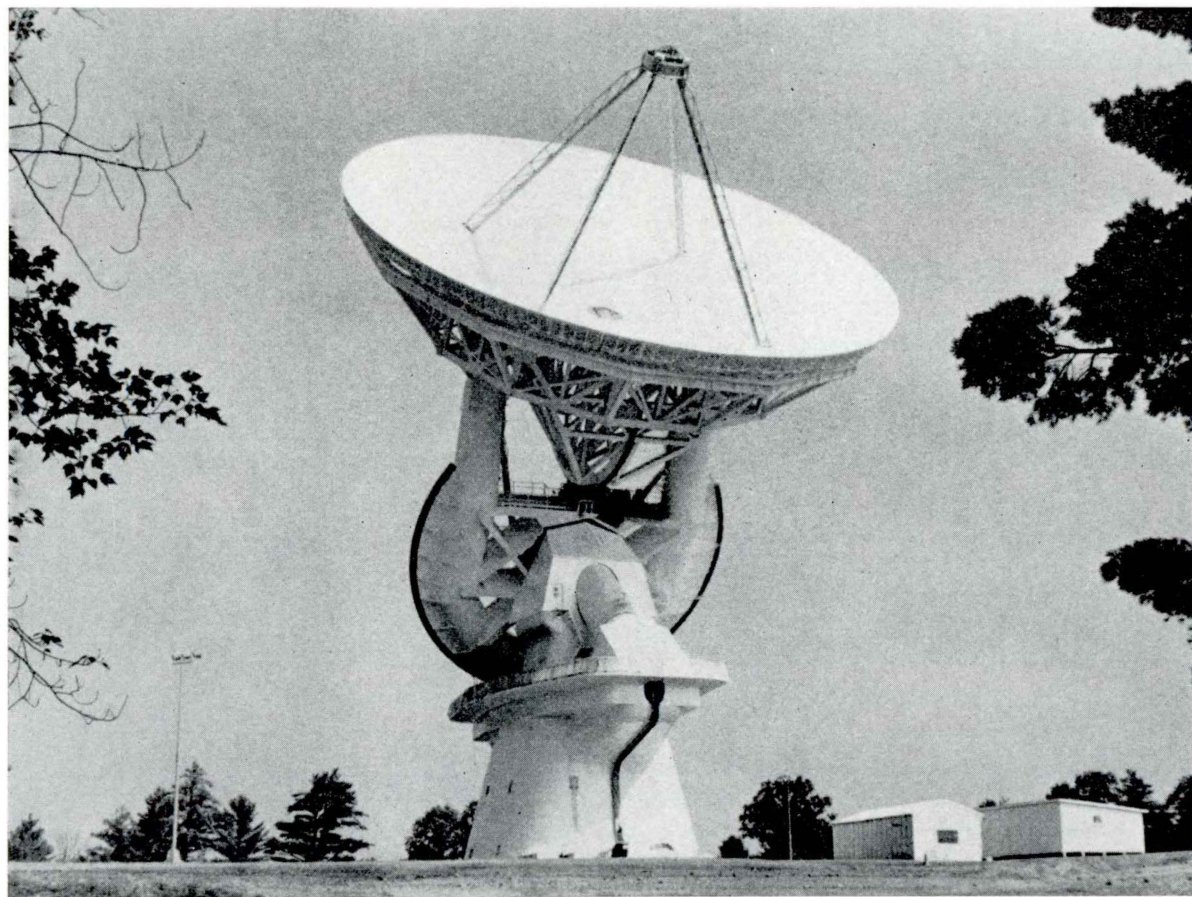
lució de la matèria, és a dir, que és el pas que lliga l'evolució termo-nuclear dels elements, que ocorre en els nuclis dels estels, amb l'evolució química de les molècules que ocorre en els cossos condensats com és ara els planetes, meteorits i cometes del nostre sistema solar.

4) Ha demostrat l'existència d'una cosmoquímica orgànica a la nostra galàxia, interessant no solament per la seva universalitat sinó també per la diversitat de les condicions físiques a què es troba sotmesa. Alhora, indica quines són les molècules capaces d'ésser sintetitzades en altres sistemes còsmics, més enllà de la nostra galàxia.

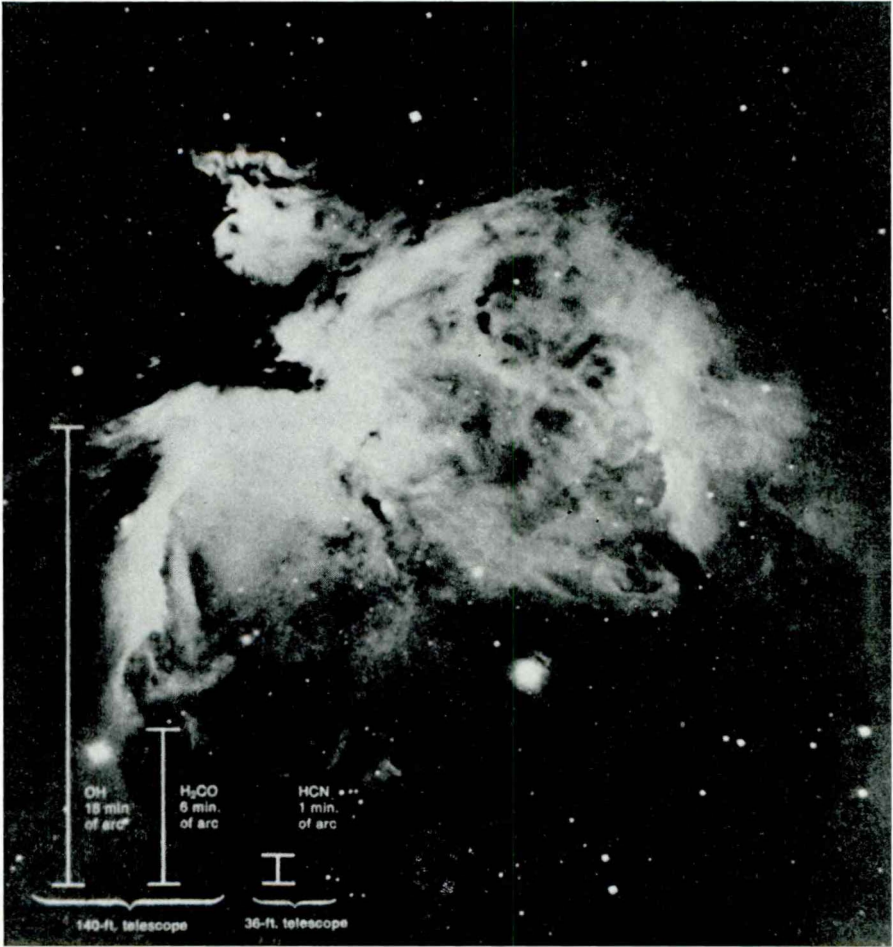
5) Finalment ofereix un model, o patró, de síntesi pre-biòtica orgànica general de gran realisme, que dona una base científica seriosa als treballs experimentals duts a terme pels investigadors que estudien el problema de l'origen de la vida.

TAULA 1. — ESPÈCIES QUÍMIQUES INTERSTEL·LARS

Any	Espècie	Símbol	Longitud d'ona	Telescopi
1934	Bandes difuses	?	4310-6700 Å	Mt. Wilson 100 polzades
1937	Radical metilidè	CH	4300 Å	Mt. Wilson 100 polzades
1940	Radical cianogen	CN	3875 Å	Mt. Wilson 100 polzades
1941	Ió radical metilidè	CH <sup>+</sup>	3745-4233 Å	Mt. Wilson 100 polzades
1970	Hidrogen molecular	H <sub>2</sub>	1100 Å	Rocket Camera
<i>Radiotelescopi</i>				
1951	Hidrogen atòmic	H	21 cm	Harvard Horn
1963	Radical hidroxil	OH	18 cm	Lincoln 84 peus
1964	Ió hidrogen	H <sup>+</sup>	3,4 cm	Lebedev 22 m
1966	Heli	He	18 cm	Harvard 60 peus
1967	Carboni	C	6 cm	NRAO 140 peus
1968	Amoníac	NH <sub>3</sub>	1,3 cm	Hat Creek 20 peus
1968	Aigua	H <sub>2</sub> O	1,3 cm	Hat Creek 20 peus
1969	Formaldehid	HCHO	6,2 cm	NRAO 140 peus
1970	Monòxid de carboni	CO	2,6 mm	NRAO 36 peus
1970	Radical cianogen	CN	2,6 mm	NRAO 36 peus
1970	Cianur d'hidrogen	HCN	3,4 mm	NRAO 36 peus
1970	X-ogen	HCO <sup>+</sup>	3,4 mm	NRAO 36 peus
1970	Cianacetilè	HC <sub>2</sub> CN	3,3 cm	NRAO 140 peus
1970	Alcohol metílic	CH <sub>3</sub> OH	36 cm	NRAO 140 peus
1970	Àcid fòrmic	HCOOH	18 cm	NRAO 140 peus
1971	Monosulfur de carboni	CS	2,0 mm	NRAO 36 peus
1971	Formamida	HCONH <sub>2</sub>	6,5 cm	NRAO 140 peus
1971	Òxid de silici	SiO	2,3 mm	NRAO 36 peus
1971	Sulfur de carbonil	OCS	2,5 mm	NRAO 36 peus
1971	Acetonitril	CH <sub>3</sub> CN	2,7 mm	NRAO 36 peus
1971	Àcid isocianic	HNCO	3,4 mm	NRAO 36 peus
1971	Isocianur d'hidrogen	HNC	3,3 mm	NRAO 36 peus
1971	Metilacetilè	CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H	3,5 mm	NRAO 36 peus
1971	Acetaldehid	CH <sub>3</sub> CHO	28 cm	NRAO 140 peus
1971	Tioformaldehid	HCHS	9,5 cm	Parkes 210 peus



RADIOTELESCOPI



NEBULOSA ORIÓ

TAULA 2. — ESQUEMA SIMPLIFICAT DE SINTESI ABIOTICA ORGANICA

<i>Molècules precursorses</i>	<i>Productes bioquímics</i>
H <sub>2</sub> + CO (Ni-Fe)	Acids grassos, hidrocarburs, etc.
HCHO + CH <sub>3</sub> CHO (OH <sup>-</sup> )	Ribosa, Desoxiribosa
RCHO + HCN + NH <sub>3</sub>	Aminoàcids
HCN + NH <sub>3</sub>	Purines, Pteridines
HC <sub>2</sub> CN + (NH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	Pyrimidines
Aminoàcids (NH <sub>2</sub> CN)	Pèptids
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> + Bases + Sucres	Nucleòtids
Nucleòtids (NH <sub>2</sub> CN)	Oligonucleòtids

## BIBLIOGRAFIA

- ADAMS, W. S. — *Identification of interstellar lines and bands*, «Publ. Astron. Soc. Pacific», 55, 217 (1943).
- BUHL, D. — *Chemical constituents of interstellar clouds*, «Nature», 234, 332 (1971).
- BUHL, D. i SNYDER, L. E. — *From radioastronomy towards astrochemistry*, «Technology Review», 73, 54 (1971).
- CARRUTHERS, G. R. — *Rocket observation of interstellar molecular hydrogen*, «Astrophys. J. (Letters)», 161, L81 (1970).
- CHEUNG, A. C., RANK, D. M., TOWNES, C. H., THORNTON, D. D. i WELCH, W. J. — *Detection of NH<sub>3</sub> molecules in the interstellar medium by their microwave emission*, «Phys. Rev. Lett.», 21, 1701 (1968).
- CHEUNG, A. C., RANK, D. M., TOWNES, C. H., THORNTON, D. D. i WELCH, W. J. — *Detection of water in interstellar regions by its microwave radiation*, «Nature», 221, 626 (1969).
- EWEN, H. I. — *Radio waves from interstellar space*, «The New Astronomy» (Scientific American, ed.), 235, Simon and Schuster, New York, 1955.
- MERRILL, P. W. — *Lines of the chemical elements in astronomical spectra*, «Carnegie Institution of Washington, Publ.», 610, Washington, D.C. (1958).
- MILLER, S. L. — *Production of some organic compounds under possible primitive Earth conditions*, «J. Amer. Chem. Soc.», 77, 2351 (1955).
- OPARIN, A. I. — *Origin of Life* (Transl. by S. Morgulis). Macmillan, New York (1938).
- ORÓ, J. — *Synthesis of adenine from ammonium cyanide*, «Biochem. Biophys. Res. Comm.», 2, 407 (1960).
- *Comets and the formation of biochemical compounds on the primitive earth*, «Nature», 190, 389 (1961).
- *Studies in experimental organic cosmochemistry*, «Ann. N.Y. Acad. Sci.», 108, 464 (1963).
- *Investigation of organo-chemical evolution*, «Current Aspects of Exobiology» (Mamikunian and Briggs, eds.), Pergamon Press, New York, 13 (1965).
- *Stages and mechanisms of prebiological organic synthesis*, dins «The Origins of Prebiological Systems and of Their Molecular Matrices» (ed. S. W. Fox). Academic Press, New York, 167-171.
- *Synthesis of organic molecules by physical agencies*, «J. Brit. Interplanetary Soc.», 21, 12 (1968).
- *Extraterrestrial organic analysis*, «Space Life Sci.», 3, 507 (1972).
- RANK, D. M., TOWNES, C. H. i WELCH, W. J. — *Interstellar molecules and dust clouds*, «Science», 174, 1083 (1971).

19. SNYDER, L. E. i BUHL, D. — *Observations of radio emission from interstellar hydrogen cyanide*, «Astrophys. J. (Letters)», 163, L47 (1971).
20. SNYDER, L. E., BUHL, D., ZUCKERMAN, B. i PALMER, P. — *Microwave detection of interstellar formaldehyde*, «Phys. Rev. Let.», 22, 679 (1969).
21. STEPHEN-SHERWOOD, E. i ORÓ, J. — *Chemical evolution. Recent syntheses of bioorganic molecules*, «Space Life Sciences» (1972).
22. TOWNES, C. H. i SCHAWLOW, A. L. — *Microwave Spectroscopy*, McGraw-Hill Book Company (1955).
23. TURNER, B. E. — *Detection of interstellar cyanoacetylene*, «Astrophys. J. (Letters)», 163, L35 (1971).
24. UREY, H. C.: *The Planets — Their Origin and Development*, Yale University Press, New Haven (1952).
25. WEINREB, S., BARRETT, A. H., MEEKS, M. L. i HENRY, J. C. — *Radio observations of OH in the interstellar medium*, «Nature», 200, 829 (1963).
26. WILSON, R. W., JEFFERTS, K. B. i PENZIAS, A. A. — *Carbon monoxide in the Orion nebula*, «Astrophys. J. (Letters)», 161, L43 (1970).