

ENSAYO*

EL ORIGEN DE LA VIDA

por Juan Oró

1. Cuestiones fundamentales

*...Mes enllà veig el cel i les estrelles,
i encara allí voldria ésser-hi hom;
si heu fet les coses a mos ulls tan belles,
se heu fet mos ulls i mos sentits per elles,
per què aclucà'ls cercant un altre com?...*

Joan Maragall

Al observar la naturaleza y contemplar el firmamento con el ánimo reflexivo que inspiró a Maragall a escribir su «canto espiritual», puede que se evoquen además de una armonía ética y estética entre el hombre y la naturaleza, una serie de cuestiones transcendentales relacionadas con nuestra propia existencia: ¿Cómo se formaron las miríadas de estrellas en el universo? ¿Cómo apareció la vida y el hombre de la Tierra? ¿Existen otros planetas alrededor de otras estre-



Don Juan Oró, profesor de Bioquímica de la Universidad de Houston, es miembro de la Junta Ejecutiva de la Sociedad Internacional para el Estudio del Origen de la Vida, Investigador de la NASA y jefe de un equipo encargado de analizar las muestras lunares traídas por los astronautas. Ha participado en el Proyecto Vikingo de exploración del planeta Marte y llevado a cabo numerosos proyectos de investigación, habiendo publicado más de 140 trabajos científicos y editado 7 libros.

* BAJO la rúbrica de «Ensayo» el Boletín Informativo de la Fundación Juan March publica cada mes una colaboración original y exclusiva de un especialista sobre un aspecto del tema general que se aborda a lo largo del año. Anteriormente fueron objeto de estos ensayos temas relativos a la Ciencia, el Lenguaje, el Arte, la Historia y la Prensa. El tema elegido para 1977 ha sido la Biología.

En Boletines anteriores se han publicado: *Control electrónico del cerebro*, por José M. Rodríguez Delgado, Director del Departamento de Fisiología de la Universidad Autónoma de Madrid; *Bioquímica de la nutrición*, por Francisco Grande Covián, Director del Instituto de Investigación de Bioquímica y Nutrición «Don Juan Carlos I-Fundación Cuenca Villoro»; *Las fronteras de la Ecología*, por Ramón Margalef, Profesor de Ecología de la Universidad de Barcelona; *Alteraciones del desarrollo cerebral*, por Federico Mayor Zaragoza, Catedrático de Bioquímica y Biología Molecular de la Universidad Autónoma de Madrid; *La bioconversión de la energía solar y la crisis energética y alimentaria*, por Manuel Losada, Catedrático de Bioquímica de la Universidad de Sevilla; *Aspectos biológicos del abuso de drogas*, por Josep Laporte, Catedrático de Terapéutica y Farmacología Clínica de la Universidad Autónoma de Barcelona; *Evolución y Darwinismo*, por Francisco J. Ayala, Profesor de Genética de la Universidad de California en Davis; y *La genética del cáncer y los virus*, por María Luisa Durán-Reynals, Profesora de Patología del Albert Einstein College de Nueva York.

llas, en los que formas de vida similares o más avanzadas que la nuestra se preguntan como nosotros lo hacemos sobre su existencia y la de otras «civilizaciones»? ¿Dónde nos lleva el mundo, o adónde vamos?

Durante toda su historia el hombre se ha formulado estas cuatro preguntas fundamentales sin esperanza de recibir una respuesta satisfactoria e inmediata. Las respuestas a la primera y a la última pregunta es posible que no se obtengan nunca. Las respuestas a las otras dos parecen más asequibles y quizá se obtendrán algún día, si se comprueba que dichas dos cuestiones fundamentales son susceptibles de tratamiento por el método científico.

2. Perspectiva y enfoque

El origen de la vida es uno de los temas fundamentales que más ha preocupado al hombre desde el principio de la historia. Esta preocupación ha sido más filosófica y espiritual que científica y ha estado estrechamente ligada al significado y transcendencia de la propia existencia del hombre. No es pues de extrañar, debido también en parte a la dificultad conceptual inherente en la formulación y comprensión de este problema, que las ideas obscuras que el hombre ha tenido sobre el origen de la vida hayan sido aceptadas sin una crítica racional durante la mayor parte de su historia.

El estudio del origen de la vida puede enfocarse desde dos puntos de vista: histórico-biológico y experimental-químico, y atacarse, respectivamente, por medio de dos métodos científicos distintos y en cierto modo complementarios, uno analítico y el otro de síntesis. El primero hace uso de las técnicas micropaleontológicas para determinar los restos más antiguos de vida existentes en los sedimentos terrestres, y llegar a conclusiones acerca de la naturaleza de los primeros seres vivos y de las circunstancias de su aparición en la Tierra. El método de síntesis se basa en una integración y reconstrucción teórica de los conocimientos obtenidos acerca de la Tierra primitiva y por extensión del sistema solar en sus fases iniciales de formación. Su objetivo principal es averiguar las condiciones que hicieron posible la síntesis abiótica de la materia orgánica y la generación de la vida en nuestro planeta, para luego intentar reproducir estas condiciones experimentalmente en el laboratorio.

En principio, el primer método puede ofrecer una solución histórica, si bien parcial, del problema, mientras que

el segundo va en busca de una solución experimental no necesariamente histórica. Por lo tanto, la complementación y compatibilidad científica de ambos métodos son requisitos indispensables para una solución más completa del problema del origen de la vida. Este ensayo presenta un resumen del estado actual de estos estudios siguiendo el segundo enfoque.

3. Planteamiento del problema

La teoría de la evolución biológica de Darwin y Wallace ofrecía ya en el siglo pasado una base lógica para el planteamiento serio del estudio del origen de la vida. Aunque las ciencias biológicas no habían entrado en su fase molecular, y por lo tanto no se podían comprender los mecanismos de transformación de un ser simple en un ser altamente desarrollado, la conclusión esencial que la teoría estableció es que el hombre y otros seres complejos se han derivado de otros seres menos complejos mediante procesos de variación (implicando cambio genético) y selección natural. Darwin elaboró la teoría de la evolución al margen de la solución del problema de la esencia y del origen de la vida. Sin embargo, consideraba que el principio de continuidad hacía probable que el origen físico de los seres vivos fuera conocido, algún día, como consecuencia de una ley general, aún desconocida, aludida por él mismo con el nombre de «pangénesis».

Partiendo de esta base el argumento lógico que podemos hacer es el siguiente: Si siguiendo el árbol filogenético que relaciona los seres más complejos con los más simples, vamos hacia atrás, de organismo en organismo, llegaremos eventualmente a un punto final en el que encontraremos la célula más simple y primitiva, ancestral de todos los seres vivos. Al llegar a este punto, que es el tronco del árbol filogenético, podemos aceptar la continuidad o la discontinuidad del proceso general de evolución. Si aceptamos la discontinuidad (e.g., teoría de la panspermia), rehusamos *ipso facto* atacar el problema frontalmente y lo transferimos a otros mundos, «hábitats» y procesos de los cuales no conocemos nada en absoluto. Si, en cambio, aceptamos la continuidad del proceso evolutivo, estamos obligados a extrapolar más allá de la célula ancestral, o tronco del árbol filogenético, hasta sus propias raíces. Es decir, tenemos que ir a niveles más bajos de organización subcelular y molecular, en busca de moléculas relativamente sencillas que tengan la capacidad estruc-

tural y funcional de interaccionar, y eventualmente conducir al auto-ensamblaje de la primera entidad viviente de tipo celular.

En otras palabras, si los organismos multicelulares (plantas, animales, hongos) proceden de la asociación de células eucarióticas, y si las células eucarióticas han sido derivadas de células procarióticas mediante procesos de simbiosis, es razonable pensar que una célula procariótica primitiva pudo originarse mediante una asociación simbiótica similar de complejos moleculares orgánicos, poseyendo cada uno de ellos, por lo menos uno de los atributos esenciales de la vida.

A través de este razonamiento el problema del origen de la vida se reduce pues, principalmente, a un problema de química prebiológica y evolución precelular. Es de interés recordar aquí que el mismo Darwin ofreció una sugerencia para un posible enfoque experimental de este problema cuando escribió a Hooker en 1871, diciendo: ...«Si pudiésemos concebir en una pequeña laguna cálida con toda clase de sales de amoníaco y fosfórico, luz, calor, electricidad, etc. presentes, que un compuesto proteínico fuese formado químicamente, dispuesto a sufrir cambios todavía más complejos...»

Concretamente, este planteamiento se basa en un proceso de evolución química gradual, que conduce a la generación progresiva de la vida, en etapas de complejidad creciente, y no de una forma repentina como propugnaban los partidarios de la generación espontánea.

4. La generación espontánea

Se ha dicho que la solución del problema de la vida se obtendrá cuando nos demos cuenta de que no existe dicho problema. Aunque de una forma general esta frase parece esencialmente correcta, de hecho no se ha visto cumplida históricamente, puesto que desde la antigüedad hasta el siglo XVIII se vino aceptando sin reparo alguno el concepto de la generación espontánea de la vida, y no por ello el problema fue resuelto. Fue precisamente cuando se quiso demostrar científicamente la validez de este concepto que el problema se puso de manifiesto, y dio lugar a una de las controversias científicas más importantes de los siglos XVIII y XIX.

Las dudas acerca de la validez de la generación espontánea de la vida a partir de distintas preparaciones de ma-

teria orgánica empezaron a raíz de los elegantes experimentos realizados por F. Redi y L. Spallanzani. El concepto de la generación espontánea quedó definitivamente refutado con los resultados de los estudios sistemáticos y rigurosos, realizados más tarde por T. Schwann, L. Pasteur y J. Tyndall. En todos estos experimentos se demostró la presencia de gérmenes microscópicos en las muestras ensayadas, que cuando eran previamente eliminados, o destruidos por un tratamiento térmico adecuado, no daban lugar a ningún crecimiento ni generación de vida.

Desde el punto de vista de la historia de la ciencia, y del valor práctico de las investigaciones básicas, puede decirse que nunca un debate sobre una cuestión tan fundamental como ésta ha producido un resultado de tanta transcendencia social práctica para el hombre. Con el tratamiento exhaustivo de las muestras por medio del calor, en recipientes cerrados, se descubrió el proceso de esterilización microbiana, que ha sido la base del desarrollo de la higiene médica y de la conservación de alimentos. Este avance sanitario es uno de los rasgos más característicos de la civilización industrial moderna, ya que gracias principalmente a la aplicación de estos conocimientos y los de la quimioterapia, la longevidad del hombre actual ha aumentado de unos treinta y cinco a unos setenta años.

En otras palabras, los estudios sobre la generación espontánea han sido de una importancia crucial para la evolución de la civilización humana. Aunque no resolvieron el problema del origen de la vida, sino que más bien lo pusieron de manifiesto, es probable que, por otra parte, hayan sido responsables de la salvación de millones de vidas humanas. Desde un punto de vista científico, los resultados negativos de estos experimentos introdujeron por inferencia valiosas limitaciones en ciertos parámetros físicos, como el de la temperatura, para el futuro estudio experimental de este problema. Y es que no puede contemplarse el uso de temperaturas elevadas (e.g., de 100°C) en cualquier nuevo planteamiento experimental de esta cuestión, ya que estas condiciones son antitéticas a las de la existencia de la vida, y como corolario, también tienen que serlo a las de cualquier proceso de generación de la vida, sea ésta espontánea o progresiva.

5. La generación progresiva

Como hemos dicho antes el mismo Darwin, aparte de aceptar la validez de los experimentos de Pasteur que re-

futaban la posibilidad de la generación espontánea, consideraba que el origen de los seres vivos había ocurrido probablemente a través de un desarrollo gradual y evolutivo de la materia. El origen de este concepto se remonta a Lamarck y desde 1809 fue expresado en distintas formas por varios hombres de ciencia, incluyendo E. Haeckel, T. H. Huxley, J. Tyndall, E. Pflüger, A. Weismann, F. J. Allen, E. A. Schäfer, H. F. Osborn y P. Becquerel. Sin embargo el estudio más sistemático y completo de este problema fue realizado por A. I. Oparin y fue publicado en 1924. Líneas semejantes de razonamiento fueron presentadas independientemente también por J. B. S. Haldane, y más recientemente por J. D. Bernal, H. C. Urey, M. Calvin y otros investigadores.

La idea fundamental de la teoría de la generación progresiva, según Oparin, es que el origen de la vida es un proceso lento y escalonado de evolución química a partir de sustancias inorgánicas y orgánicas simples altamente reducidas, que ocurrió de una forma natural durante la formación y desarrollo de la Tierra primitiva. Más concretamente y siguiendo su propia descripción, Oparin intentó demostrar cómo los compuestos más simples de carbono, los hidrocarburos, pudieron ser formados en nuestro planeta. Asimismo consideró que la evolución de estos compuestos dio lugar primero a la formación de compuestos semejantes a la proteína y luego a sistemas coloidales que sufrieron una gradual diferenciación de su organización interna como resultado de la selección natural.

De acuerdo con una comunicación personal del autor las ideas iniciales de Oparin fueron inspiradas por uno de los fundadores de la química, Dm. I. Mendelieff. En su teoría del origen del petróleo, hoy día abandonada, Mendelieff sostenía que el petróleo se formó abiogénicamente por la acción del agua sobre carburos metálicos en lugares interiores de la Tierra durante los grandes movimientos geológicos. Era por lo tanto lógico pensar que si el petróleo, que tiene muchas propiedades en común con la composición de la materia orgánica de los seres vivos, se formó por reacciones puramente químicas, procesos semejantes podían haber sido responsables, en la Tierra primitiva, de la formación de la materia orgánica primordial, de la cual se generaron los seres vivientes. El hecho de que el petróleo sea de origen biológico, no invalida la propuesta de la posible formación de hidrocarburos por hidrólisis de carburos metálicos, hecho este último que ha sido demostra-

do experimentalmente en el laboratorio en muchas y diversas ocasiones desde el siglo pasado.

6. La vida como proceso negentrópico

La clásica frase de A. Einstein «Dios no juega a los dados», usada algunas veces para indicar el alto grado de orden implícito en la vida, puede interpretarse indirectamente como el postulado de que todo proceso creativo o de aumento de orden no puede ser el resultado del caos o de procesos naturales al azar.

A pesar de todos los avances científicos y tecnológicos de este siglo, nuestros conocimientos sobre la esencia y el origen de la vida son todavía bastante incompletos. Y es que la vida parece ser un proceso negentrópico o de aumento de orden en el resto del universo. Es decir, único entre todos los procesos negentrópicos del universo que el ser humano ha sido capaz de observar hasta el presente.

¿Quiere decir esto que existen otros procesos negentrópicos u ordenadores en el universo? La respuesta es afirmativa. En el mundo megascópico hay que considerar como tales la formación y evolución de galaxias y de sistemas estelares y planetarios, y a nivel microscópico, la formación de los elementos químicos en el interior de las estrellas así como la formación de moléculas en el espacio interestelar y en los cuerpos celestes de los sistemas planetarios.

Desde un punto de vista entrópico, la vida es un proceso auto-ordenado que tiene la capacidad de generar más orden, con la consiguiente disminución de entropía en el medio interior y en la esfera de acción constructiva del ser viviente. Ello tiene lugar a expensas del uso de materia y energía externas, con el correspondiente aumento de la entropía del medio circundante. Así pues, el aumento localizado de orden en el proceso vital, como en cualquier otro proceso negentrópico, se consigue a base de un incremento de desorden en el resto del universo. Es decir, en la formación y transformación de los sistemas negentrópicos abiertos, el aumento externo de entropía es siempre superior, en términos absolutos, a la disminución de la misma en el medio interno, sea éste una estrella, un sistema solar, un átomo de carbono, una molécula orgánica, o un ser viviente.

Ahora bien, si se compara la vida con otros procesos negentrópicos se observan varias diferencias significativas.

Mientras que en la mayoría de estos procesos (formación de estrellas, elementos químicos, etc.) se emiten grandes cantidades de energía, la vida requiere un continuo aporte de energía para su existencia y desarrollo. Pero quizás las propiedades más características de la vida que no son completamente compartidas por los otros procesos negentrópicos, son las que están asociadas con los atributos fundamentales de los seres vivos cuando éstos son considerados como *entidades individuales con capacidad de metabolismo, autoduplicación, mutación y evolución a lo largo de sucesivas generaciones*. El examen de varios de los procesos negentrópicos que debieron preceder a la síntesis de la materia orgánica y a la aparición de estas propiedades o atributos esenciales de la vida se presenta brevemente a continuación, siguiendo un esquema teórico de la evolución de la materia.

7. Evolución de la materia. Niveles de complejidad

Hay al menos seis niveles de complejidad en la organización de la materia, donde procesos de desarrollo negentrópico o de evolución se manifiestan con mayor o menor claridad. Estos niveles incluyen:

1. Partículas elementales subatómicas.
2. Elementos químicos (ej., núcleos y átomos).
3. Sistemas gravitacionales (ej., galaxias, estrellas, planetas).
4. Moléculas (ej., monómeros, polímeros, cristales).
5. Sistemas orgánicos autoduplicantes (ej., complejos moleculares protobiológicos, virus).
6. Sistemas biológicos (ej., organismos celulares y multicelulares).

En todos estos procesos la interacción de formas elementales de la materia en condiciones apropiadas da lugar a la generación de formas materiales de mayor complejidad. En este aumento progresivo de la complejidad, cuando se llega a un cierto estado crítico, tiene lugar una transformación importante de la materia, adquiriendo ésta nuevas formas y propiedades, y obedeciendo a un nuevo sistema de leyes que sin ser exclusivo es característico del nuevo estado. Es algo así como la aparición de una nueva entidad o una nueva dimensión fenomenológica en cada transición evolutiva principal. Así, por ejemplo, del mundo policrómico y todavía no muy bien comprendido de las partículas elementales, se pasa al mundo de los núcleos atómicos regidos por las potentes fuerzas nucleares. El nú-

cleo más simple es el del hidrógeno. Cuando la acumulación del hidrógeno adquiere como mínimo la masa crítica estelar ($1/16$ de la masa del Sol) aparecen los procesos termonucleares que dan lugar a la generación de las estrellas por una parte y de los elementos químicos por otra. Aquéllas están regidas por leyes gravitacionales y nucleares y éstos en su estado libre (átomos) o combinado (moléculas) están regidos por las estrictas leyes cuánticas. Las interacciones de las moléculas se rigen a su vez por un sistema de leyes fisicoquímicas fundamentales.

Las fases más importantes de desarrollo negentrópico, o de evolución de la materia, que van por así decirlo desde el hidrógeno a la vida, se describen brevemente a continuación.

8. Evolución de los sistemas gravitacionales

Durante las décadas pasadas se ha avanzado bastante en el estudio del microcosmos de las partículas elementales y del macrocosmos de los sistemas gravitacionales (galaxias, estrellas, planetas, etc.). Aunque todavía estamos lejos de tener una clara comprensión de las leyes que rigen la interrelación, genealogía y evolución de las partículas elementales, se va adquiriendo, poco a poco, un mejor entendimiento de la formación y evolución de los sistemas galácticos, estelares y planetarios.

Estudios recientes sobre la heterogeneidad de la distribución de isótopos en el sistema solar, y observaciones sobre las estrellas jóvenes situadas en nebulosas contiguas a explosiones de supernovas, demuestran el papel importante de dichas explosiones cósmicas como iniciadoras del proceso de formación estelar. La formación de un sistema estelar (con o sin planetas) tiene lugar al parecer por interacción y condensación de nubes interestelares de polvo y gas en ciertas regiones del espacio (por ejemplo, la Gran Nebulosa Orion), cuando la cantidad de materia de estas nubes llega a una masa crítica suficiente para producir un colapso gravitacional con ayuda del tren de ondas energéticas de una supernova, y generar un cuerpo estelar, que puede ir acompañado de otros cuerpos luminosos (estrellas secundarias) y no luminosos (planetas).

De especial interés con relación al problema del origen de la vida son los estudios recientes, que sugieren que el 20 por 100 de las estrellas semejantes al Sol (y situadas en el hemisferio norte a más de ochenta y cinco años luz)

tienen planetas que giran a su alrededor. Aparte del aumento de orden, que significa la transformación de una masa interestelar más o menos caótica en un sistema planetario como el sistema solar, estas observaciones son importantes desde el punto de vista del principio de la continuidad evolutiva químico-biológica, porque por primera vez ofrecen la posibilidad de un cálculo teórico del número de los planetas semejantes a la Tierra en los que pueda existir vida.

El orden de los sistemas gravitacionales se observa con esplendor en los sistemas planetarios como el sistema solar, donde varios cuerpos celestes no luminosos (planetas, cometas, etc.) con masas inferiores al 1 por 100 de la masa solar, giran alrededor de la estrella central. Este orden, incluso, trasciende a la estructura y dinámica interna y externa de cada uno de estos cuerpos celestes, como puede observarse, por ejemplo, en el caso del planeta Júpiter, que con sus múltiples satélites forma un sistema solar en miniatura.

Las fuerzas determinantes de este orden y de la evolución de los sistemas estelares y planetarios son, principalmente, termonucleares y gravitacionales, complementadas por otros procesos. En conjunto el sistema solar disipa continuamente, en forma radiante, energía termonuclear y gravitacional al espacio interestelar. Por lo tanto, el orden del sistema solar no podrá continuar así indefinidamente. Sin embargo, su duración probablemente rebasará el período de actividad termonuclear del Sol, calculado aproximadamente entre unos 7 y 10 mil millones de años, y el de la existencia de la vida en la Tierra.

9. Evolución nuclear o atómica

Aproximadamente el 87 por 100 de la materia estelar e interestelar está constituida por hidrógeno, el 12 por 100 por helio, menos del 1 por 100 por neon, carbono, nitrógeno y oxígeno, y la restante fracción del 1 por 100 por todos los otros elementos juntos.

El hidrógeno es el elemento químico más abundante y primordial del universo, del cual se han formado y se forman todos los otros elementos químicos. Los de mayor interés para la evolución química son el carbono, el nitrógeno, el oxígeno, el fósforo, el azufre y ciertos metales, como el magnesio, el hierro, etc.

El proceso de formación de estos elementos químicos ocurre en el interior de las estrellas a temperaturas de mi-

llones de grados por reacciones de fusión termonuclear. Así, cuatro protones por condensaciones sucesivas dan lugar a la formación del núcleo de helio o partícula alfa. Tres partículas alfa, a su vez, se condensan dando lugar a la formación del núcleo de carbono. A partir del carbono por condensación con dos protones se forma el núcleo de nitrógeno, y por captura de una partícula alfa se forma el núcleo de oxígeno.

A través de otras reacciones termonucleares similares se forman el azufre, el fósforo y todos los demás elementos químicos. Como se sabe, la pequeña pérdida de masa que ocurre en estas reacciones de fusión nuclear se convierte en energía térmica y radiante de acuerdo con la ecuación de Einstein ($E = mc^2$).

Las dos primeras reacciones termonucleares que dan lugar a la formación del helio y del carbono son de un interés singular para el hombre. La primera es la fuente de energía del Sol y hace posible la existencia de la vida en la Tierra. Basta recordar que la energía solar que recibe nuestro planeta en sólo cuatro días es equivalente a toda la energía acumulada en la Tierra en forma de combustibles fósiles. La segunda reacción nuclear, por el mero hecho de producir el carbono, proporciona la base fundamental para la síntesis de los compuestos orgánicos que, como se sabe, son necesarios para la generación de la vida.

Mientras que la formación del helio y la transformación de carbono en nitrógeno ocurre en el interior del Sol a temperaturas de unos 10 millones de grados Kelvin, la formación del carbono por condensación de 3 partículas alfa (proceso triple alfa) requiere temperaturas de 100 millones de grados Kelvin, que se dan en el interior de estrellas más masivas que el Sol. Otros elementos, como el hierro, etc., se forman en estrellas aún mayores o por otros procesos, como en las explosiones de las supernovas.

10. El carbono y otros elementos organogénicos

En las reacciones nucleares de las partículas alfa, *a priori* parece que debería formarse una mayor cantidad de núcleos de berilio (Be^8) que de carbono (C^{12}) puesto que el primero requiere sólo dos y el segundo tres partículas alfa para su formación. Sin embargo, en la realidad ocurre exactamente al revés. Ello se debe a que el núcleo de berilio es muy inestable y se descompone de nuevo en partículas alfa a la temperatura de 100 millones de grados, mientras que el núcleo de carbono recién formado, se con-

vierte rápidamente en un estado muy estable (debido probablemente a la alta simetría interna del núcleo de carbono 12), minimizando así su descomposición y acumulándose progresivamente en el interior de las estrellas a pesar de la alta improbabilidad del fenómeno de colisión inicial.

Así se explica que el carbono sea el elemento más abundante del universo después del hidrógeno, si se exceptúan los gases nobles helio y neon. Este hecho paradójico es de importancia crucial para la existencia de la materia orgánica y de la vida, ya que como se ha indicado antes a partir del carbono se forman también por reacciones nucleares el nitrógeno, el oxígeno, el azufre y el fósforo que constituyen, junto con el hidrógeno, los elementos esenciales de los compuestos orgánicos de todos los seres vivos, por lo que se les ha llamado elementos organogénicos.

Como consecuencia de esta propiedad excepcional del carbono, de su síntesis nuclear y de las síntesis nucleares subsiguientes, estos seis elementos característicos de la materia orgánica (H, C, N, O, S, P) son de los más abundantes en el universo. Además, es de interés observar que su abundancia cósmica relativa es casi idéntica a la abundancia relativa de los mismos en la materia orgánica de los seres vivos. Por tanto, en contra de la impresión superficial que se obtiene considerando la composición esencialmente inorgánica de la Tierra y los otros planetas terrestres, puede hacerse la hipótesis de que la química que predomina en el universo es la química orgánica y no la inorgánica.

Esta hipótesis fue presentada por el autor con el título de «cosmoquímica orgánica» en la Academia de Ciencias de Nueva York hace quince años y ha sido confirmada extensamente con posterioridad, gracias al rápido avance de la radio-astronomía en la exploración del espacio interestelar de nuestra galaxia. Es decir, mediante los espectros de absorción y emisión de microondas y de radiación ultravioleta, se ha confirmado la existencia de un grupo muy interesante de moléculas orgánicas y otras especies químicas en el medio interestelar.

11. Evolución molecular. Moléculas interestelares

Los elementos organogénicos se combinan originando moléculas simples. Está comprobada la presencia de estas moléculas en las nubes interestelares. El testimonio más contundente proviene de las observaciones hechas con los radiotelescopios en los Estados Unidos y en Australia. En el año 1968 se encontraron por primera vez en nuestra

galaxia moléculas de amoníaco (NH_3) y agua (H_2O), y en 1969 de formaldehído (HCHO). Desde entonces en nuestra galaxia y en otras galaxias se han encontrado más de 35 moléculas, casi en su totalidad orgánicas. Lo más interesante es que la mayoría de ellas son las que se habían usado anteriormente en experimentos de síntesis abiótica de compuestos orgánicos. Entre las más importantes se encuentran estas 10 moléculas: agua, amoníaco, hidrógeno, monóxido de carbono, formaldehído, tioformaldehído, acetaldehído, ácido cianhídrico, cianoacetileno y cianamida. Una de las moléculas más complejas descubiertas recientemente es el cianotriacetileno (HC_3N), una molécula lineal con un hidrógeno, seguido de tres grupos acetileno contiguos y un grupo nitrilo al final. Su peso molecular es de 99 Daltons.

El estado de ordenación de los átomos en las distintas moléculas orgánicas es sin duda superior al de la distribución al azar de los átomos en cualquier fase gaseosa o líquida, lo que hace difícil concebir la existencia del proceso negentrópico de formación de moléculas en el vacío del espacio interestelar. Sin embargo, esta dificultad se resuelve en parte cuando se considera que los radicales diatómicos (C_2 , CH , CO , CN , NH , OH) precursores de estas moléculas se encuentran en la superficie de estrellas como el sol (6000°K), y que eventualmente son expulsados al espacio interestelar por distintos procesos estelares que varían en intensidad desde el viento solar hasta una explosión supernova. Por otra parte, muchas de estas moléculas interestelares se encuentran en regiones donde hay también polvo o partículas inorgánicas estelares que protegen a las moléculas orgánicas de su destrucción por radiaciones ultravioleta. Así mismo, estas partículas sólidas actúan como centros de acción catalítica para la recombinación o síntesis de las moléculas orgánicas.

12. Evolución molecular. Moléculas orgánicas en el sistema solar

La nebulosa y el sistema solar fueron formados por el colapso gravitacional de nubes interestelares, a través de un proceso de creación que no fue completamente homogéneo. Por lo tanto su composición debió depender de la composición de las nubes interestelares y de las condiciones existentes al final de la transformación de estas nubes en nebulosa y en sistema solar. Tanto si esta transformación ocurrió inicialmente a temperaturas de 2.000 grados

Kelvin o a temperaturas más altas, los compuestos transitorios de carbón, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno que se formaron fueron probablemente semejantes a los mismos radicales diatómicos (C_2 , CN, CO, CH, NH, OH) que se observan, actualmente, en la superficie del sol. Estas seis especies químicas constituyen seis de los grupos funcionales diatómicos más característicos de los compuestos orgánicos. Por tanto, al condensarse a temperaturas más bajas debieron convertirse primero en moléculas semejantes a las que se encuentran en las nubes interestelares y luego en moléculas más complejas, como las que se encuentran en los planetas jovianos, en los cometas o en los meteoritos carbonáceos.

Observaciones astronómicas hechas por medio de telescopios ópticos acerca de las atmósferas de los planetas jovianos incluyen el hallazgo de fosfamina (PH_3) en la atmósfera de Jupiter, junto con amoníaco (NH_3), agua (H_2O), metano (CH_4), hidrocarburos y varios compuestos de azufre. Estos últimos se creen responsables en parte de las coloraciones amarillas, marrón y rojizas de las zonas ecuatoriales del planeta.

Los cometas, que han captado la imaginación del hombre desde el amanecer de la historia, contienen al parecer grandes cantidades de compuestos de carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno de complejidad semejante o mayor que la de las moléculas interestelares. Estos cuerpos celestes ofrecen uno de los mejores ejemplos para el estudio de la formación y evolución de las moléculas orgánicas en el sistema solar. No sería de extrañar que estos cuerpos celestes tuviesen también grandes cantidades de aminoácidos, purinas, pirimidinas y otros compuestos bioquímicos. De todos modos la materia de los cometas se considera junto con la de los meteoritos carbonáceos de tipo I, como la materia más primordial del sistema solar. La importancia de los meteoritos carbonáceos ha sido reconocida desde principios del siglo pasado, cuando la primera de estas piedras celestes analizada por Thenard, en 1806, indicó la presencia de materia orgánica. Estos estudios fueron continuados con éxito principalmente por J. J. Berzelius, F. Wöhler y M. Berthelot. Otros investigadores causaron grandes controversias científicas, una vez en el siglo pasado y dos veces en este siglo, cuando, equivocadamente, creyeron haber encontrado organismos extraterrestres en varios de estos meteoritos.

Estudios recientes realizados en varios laboratorios, incluyendo el nuestro, han demostrado que dichos cuerpos

celestes proceden probablemente de la parte más externa del cinturón de los asteroides (y quizá también de los cometas) y que contienen sustancias orgánicas semejantes a las que existen en los seres vivos. Estas incluyen hidrocarburos y varios tipos de monómeros bioquímicos como los aminoácidos, hidroxiácidos (ambos en mezclas racémicas), purinas, etc., y polímeros orgánicos muy complejos. Dichos resultados ofrecen, sin duda, uno de los apoyos analíticos más fuertes a la teoría de la evolución química, con relación al origen de la vida en el sistema solar.

13. Síntesis de monómeros bioquímicos

Los resultados obtenidos durante los pasados veinticinco años en la síntesis de compuestos bioquímicos bajo las condiciones prebiológicas de la nebulosa solar o de la Tierra primitiva han proporcionado también un fuerte apoyo experimental a la teoría de la evolución química.

Es de interés anotar que dichos compuestos se han podido sintetizar sin grandes dificultades, y que en ciertos casos, como en el de los aminoácidos e hidroxiácidos, los productos obtenidos son prácticamente idénticos a los que se han encontrado en los meteoritos carbonáceos. Respecto a los tipos de energía usados en estos experimentos se incluyen varias formas de energía existentes en la Tierra primitiva, por ejemplo, descargas eléctricas, luz ultravioleta, radiación ionizante y energía térmica.

Respecto a las mezclas de moléculas que pueden ser usadas como sustratos en estas reacciones de síntesis abiótica, muchas de las moléculas sencillas de las nubes interestelares y del sistema solar que se acaban de describir son muy efectivas. Estas incluyen en primer lugar, por ejemplo, las mezclas clásicas de metano, amoníaco y agua (CH_4 , NH_3 , H_2O con o sin H_2S), que representan en parte la composición de las atmósferas de los planetas jovianos, de los cometas y posiblemente también de la nebulosa solar primordial, y en segundo lugar, las mezclas gaseosas semejantes a las emanaciones volcánicas terrestres (por ejemplo, CO , N_2 , H_2 , H_2O , H_2S), y variaciones de estos dos tipos de mezclas.

Como se ha indicado, la síntesis prebiótica de monómeros bioquímicos se logró antes que el descubrimiento de las moléculas interestelares, cuando se puso a prueba experimental parte de la teoría de la evolución química de Oparin. La teoría recibió su primer apoyo científico con el clásico experimento de S. L. Miller que demostró la formación de varios aminoácidos proteínicos y no proteínicos

por la acción de descargas eléctricas sobre una mezcla de metano, amoníaco y agua. Esta síntesis fue seguida por otros experimentos en varios laboratorios.

En nuestro laboratorio se logró la síntesis de las purinas adenina y guanina, aminoácidos y otras moléculas bioquímicas a partir del ácido cianhídrico. También se sintetizaron en nuestro laboratorio los ácidos grasos, las pirimidinas uracilo y timina, la deoxiribosa, los nucleótidos y los deoxinucleótidos, y recientemente hemos descubierto un método prebiótico más o menos universal, de deshidratación a partir de la cianamida, para la síntesis de glicéridos, péptidos y nucleósido-trifosfatos. Puede decirse que con la excepción de ciertos problemas que todavía existen sobre la formación de nucleósidos, la mayor parte de los monómeros y compuestos bioquímicos más importantes se han sintetizado en varios laboratorios bajo condiciones que fueron posibles en la Tierra primitiva.

La validez científica de estos experimentos con relación al principio de continuidad evolutiva de la materia queda demostrada cuando se observa que a partir de unas doce moléculas interestelares se pueden obtener en el laboratorio, prácticamente, todos los monómeros bioquímicos fundamentales, proporcionando asimismo, algunas de estas moléculas interestelares, las condiciones necesarias para ciertos procesos de síntesis orgánica. Esto se resume en la tabla siguiente:

Tabla 1. Monomeros bioquímicos (y condiciones de síntesis) que pueden obtenerse a partir de moléculas interestelares

Moléculas interestelares		Condición o monómero bioquímico
H ₂ O	Agua	disolvente universal y agente hidroxilante
NH ₃	Amoníaco	catalizador básico y agente amiante
CO (H ₂)	Monóxido de carbono	hidrocarburos y ácidos grasos
CH ₂ O	Formaldehído	monosacáridos (ribosa) y glicerol
CH ₃ CHO	Acetaldehído	deoxipentosas (deoxiribosa)
RCHO (HCN)	Aldehídos	aminoácidos
CH ₂ S (HCN)	Tioformaldehído	cisteína y metionina
HCN	Acido cianhídrico	purinas (adenina, guanina)
HC ₃ N	Cianoacetileno	pirimidinas (citosina, uracilo, timina)
H ₂ NCN	Cianamida	polipéptidos y polinucleótidos
PĤ ₃	Fosfamina (Júpiter)	fosfatos y polifosfatos

Se sale del alcance de este ensayo entrar en más detalles sobre estos y otros experimentos prebióticos realizados en distintos laboratorios.

14. Síntesis de polímeros. Condiciones de la Tierra primitiva

Sea cual fueren las condiciones de la Tierra primitiva en sus fases iniciales de formación, las condiciones realmente relevantes con relación al problema del origen de la vida son las que existieron en la fase de síntesis de los polímeros biológicos. Estas condiciones están circunscritas dentro de unos límites no muy amplios, debido a los márgenes limitados de interacción y estabilidad química de estas moléculas sumamente frágiles.

Es decir, se requiere que estas reacciones tengan lugar en soluciones acuosas a temperaturas moderadas, por ejemplo entre 0 y 70° C, partiendo de concentraciones suficientes de monómeros bioquímicos, que pueden lograrse fácilmente por evaporación. Otras condiciones requeridas son que exista un agente condensante o catalizador para estas reacciones, que el pH esté cerca de la neutralidad y que existan cambios cíclicos de temperatura y periodos alternantes de humedad y sequedad para facilitar la condensación y el «crecimiento» progresivo de los polímeros lineales sintetizados.

En estas condiciones y con la ayuda de la cianamida y ciertos catalizadores se ha logrado en nuestro laboratorio la síntesis de oligopéptidos, oligonucleótidos y otros compuestos bioquímicos. Parece ser que estas reacciones llevadas a cabo en condiciones realísticas ofrecen un sistema unificado para la síntesis prebiótica de las macromoléculas biológicas. Como se sabe, los dos grupos de macromoléculas biológicas más importantes son los ácidos nucleicos (ADN y ARN), moléculas genéticas indispensables para la organización y duplicación de todo ser vivo, y las proteínas, moléculas catalíticas y funcionales que participan en todos los procesos metabólicos, de crecimiento y de interacción de los seres vivos.

Durante las dos últimas décadas se han obtenido resultados que prometen aclarar en un futuro no muy lejano el problema de la síntesis prebiótica de estos dos tipos de macromoléculas esenciales para la vida. Uno de los problemas más importantes que queda por resolver es el de la replicación no enzimática del ácido ribonucleico o deoxirribonucleico y el establecimiento de una interrelación autocatalítica sintetizante entre los polinucleótidos y los polipéptidos.

15. Evolución protobiológica

Entramos así en el eslabón más complicado y menos conocido de nuestra cadena evolutiva; es decir, saber qué mecanismos fueron y son responsables de la interacción entre proteínas y ácidos nucleicos y que dieron lugar al primer sistema molecular capaz de reproducirse por sí mismo. Esto constituye la quintaesencia de la fase llamada evolución protobiológica. El entendimiento cabal de esta fase evolutiva equivaldría a penetrar más allá del misterio del código genético y de la relación estructural-informacional entre los ácidos nucleicos y las proteínas. Equivaldría también a conocer el proceso de aparición de la primera enzima, que, según F. G. Hopkins, fue el suceso más importante de la historia del universo, con el que el mundo pasó de estéril a fecundo y de la no vida a la vida.

Se desconoce si las asociaciones cooperativas de macromoléculas biológicas sintetizadas en la ausencia de enzimas pueden aportar las bases para el origen de la vida molecular o subcelular. Hace algún tiempo, cuando participé en un curso de verano sobre biología en Cambridge, Inglaterra, hice una sugerencia muy preliminar en esta dirección que implicaba cuatro tipos específicos de moléculas. Después de resumir las etapas principales de la evolución química, discutí brevemente la evolución subcelular, aproximadamente como sigue:

La fase principal que se cree siguió a la formación de compuestos bioquímicos, fue la constituida por una serie de procesos catalíticos y de auto-organización estructural que probablemente tuvieron lugar inmediatamente antes e inmediatamente después de la aparición del primer sistema molecular autorreproductivo. Este llamado período de evolución subcelular es muy poco conocido pero ciertamente es el más importante acontecimiento de la evolución química orgánica, puesto que señala la aparente discontinuidad principal entre los mundos viviente y no-viviente.

De la mayor importancia dentro de esta transición evolutiva son cuatro procesos únicos, de síntesis, probablemente responsables de la aparición e interacción cooperativa de las cuatro moléculas o complejos moleculares siguientes:

a) *Molécula biocatalítica. Protoenzima.*—Pequeño péptido lineal de 4 o más unidades monoméricas, con aminoácidos polifuncionales tales como la arginina, la histidina, la serina, etc., y con la facultad de formar complejos con oligonucleótidos.

b) *Molécula autoduplicativa codificante. Proto-ADN o Proto-ARN.*—Oligonucleótido lineal de 12 o más unidades monoméricas, con bases idénticas o distintas y con la posibilidad de formar complejos con otros oligonucleótidos (complementarios) y oligopéptidos.

c) *Molécula traductora de un código. Proto-tARN.*—Pequeño oligonucleótido lineal combinado con un aminoácido terminal que tiene la posibilidad de formar estructuras intramoleculares en horquilla, capaces de enlazarse o o formar complejos con los anteriores nucleótidos y pep-tidos.

d) *Molécula o sistema de moléculas interfásicas. Pro-tomembrana.*—Molécula de lípido anfotero capaz de formar una estructura esférica estable y semipermeable para la separación de su fase orgánica interna del medio exterior.

16. Vida subcelular. Previrus

Antes de la aparición de una entidad celular bien definida debieron existir sin duda sistemas subcelulares como los cuatro que se acaban de describir brevemente. Aunque no se haya mencionado ello explícitamente, en estos cuatro sistemas se incluyen también implícitamente otros dos: el protorribosoma, que forma parte del sistema biocatalítico o protoenzimático y el protoplasma precelular que por definición constituye el medio orgánico interno circunscrito por la protomembrana.

En teoría, podían haberse producido complejos bimo-leculares y trimoleculares por auto-ensamblaje de los primeros dos o tres tipos de moléculas anteriores, que tienen las propiedades correspondientes a los atributos más esenciales o procesos fundamentales de la vida, sin implicación necesaria de la existencia de una célula viva en el medio prebiótico.

Uno de los sistemas anteriores más interesantes es el proto-ADN o proto-ARN porque en sí tiene inherente la potencialidad de duplicación, que puede manifestarse con la ayuda de una molécula catalítica (condensante) o un protoenzima. Por lo tanto es concebible que una de las primeras formas de vida subcelular fuese un previrus, algo así como un pequeño virus de ADN o ARN, o simplemente una cadena de ácido ribonucleico o deoxiribonucleico que puede adoptar una forma lineal o circular. La primera molécula condensante podría ser la cianamida.

Así pues, en un medio prebiológico, con suficientes cantidades de nucleósido-trifosfatos, cianamida y otros agentes coadyuvantes no es difícil imaginar cómo estos previrus puedan crecer linealmente y duplicarse. Para el primer proceso se necesita la elongación abiótica de los nucleótidos que ya ha sido demostrada experimentalmente. Para el segundo, se requiere la demostración de la duplicación prebiótica de polinucleótidos que todavía no se ha conseguido de una forma efectiva, pero que puede que ocurra en un sistema como el que se ha usado en nuestro laboratorio para la síntesis de esteres de ácidos grasos, peptidos, y oligodeoxyribonucleótidos.

Quizás la clave del problema resida en llevar a cabo las reacciones a temperaturas suficientemente bajas (por ejemplo 4° C) para que los enlaces de hidrógeno entre las bases complementarias (A-T y C-G) sean suficientemente estables y permitan la reacción de condensación simultánea de los nucleósido-trifosfatos ordenados sobre el molde del polinucleótido del pequeño previrus. En este caso, esta reacción sería más rápida que la reacción de alargamiento del polinucleótido por uno de sus extremos, y daría un aumento rápido del número de moléculas del previrus. Es decir se habría pasado de la química ordinaria de simple «crecimiento» lineal a la de duplicación de polímeros que es, sin duda, uno de los pasos más decisivos en la aparición de la vida subcelular.

Una vez que uno de los péptidos protoenzimáticos sintetizados simultáneamente, en el mismo sistema prebiótico, pudiese llevar a cabo la síntesis del polinucleótido, empezaría una nueva fase de duplicación del previrus. La existencia de varios previrus y varios protoenzimas «parasitando» por así decirlo la materia orgánica de las lagunas cálidas de la tierra primitiva establecería una competición entre distintos previrus, alguno de los cuales podría adquirir una mayor capacidad competitiva por asociación con otros complejos protobiológicos que potenciasen su estabilidad, o su velocidad de autoduplicación.

17. Entidades precelulares

La existencia de una entidad viviente más compleja, un probable precursor de la primitiva célula procariota, pudo haber sido posible mediante la inclusión de los tres primeros sistemas arriba citados dentro de la protomembrana. Esta pudo haber originado a partir de lípidos, o péptidos,

o mezclas de ambas sustancias y adquirido la forma de una esfera microscópica o un coacervado.

Si se acepta el desarrollo de una entidad molecular microscópica con separación de fases internas y externas se necesita luego demostrar su capacidad de funcionar como entidad independiente. Una de las mayores preocupaciones de A. I. Oparin ha sido desarrollar una hipótesis de evolución precelular y demostrar experimentalmente que pueden tener lugar reacciones bioquímicas específicas dentro de entidades precelulares simuladas (coacervados). En un elegante experimento, usando polinucleótido-fosforilasa en microesferas o coacervados y el sustrato adecuado en el medio externo, observó un gasto continuo del sustrato, una síntesis interna rápida de polinucleótidos y una liberación continua de fosfato al medio externo. Esto demuestra que un coacervado, con una interfase más simple que una membrana celular, es suficiente para permitir intercambios iónicos y reacciones sintéticas internas que simulan el metabolismo celular.

18. Teorías de auto-organización macromolecular

Un tratamiento general matemático de la auto-organización de la materia precelular y la evolución de macromoléculas fue presentado en detalle por M. Eigen y H. Kuhn hace unos años. Una serie de principios evolutivos y selectivos se dedujeron para estados macromoleculares que conducen a estados de complejidad y contenido de información creciente. Sería muy deseable correlacionar los aspectos teóricos de estas propuestas con las fases moleculares experimentales sugeridas anteriormente para integrarlos en una teoría de la evolución precelular que pudiera ser comprobada experimentalmente.

19. Vida estraterrestre

Los resultados de los experimentos biológicos del proyecto Vikingo indican que es bastante probable que no haya vida en el planeta Marte. Los análisis *in situ* del material de la superficie de Marte obtenidos por pirólisis-cromatografía de gases y espectrometría de masas y realizados por medio de un instrumento proyectado por el autor, han indicado la ausencia de materia orgánica en el planeta rojo, observación que es consistente con la ausencia de vi-

da, al menos en los dos sitios, *Chryse Planitia* y *Utopia Planitia*, en que se posaron las dos naves espaciales.

Si estos resultados son confirmados por misiones espaciales posteriores y partiendo de la base de que las posibilidades de vida en otros planetas o satélites son todavía menores que en Marte, la única conclusión lógica a que puede llegarse es que en el sistema solar sólo existe vida en la Tierra.

Este resultado es de interés porque limita de una forma bastante precisa las condiciones necesaria para que pueda aparecer vida en un cuerpo celeste. Y éstas son por comparación con la Tierra, las siguientes: Que posea una masa suficiente para retener agua y compuestos volátiles para que pueda formar océanos y una atmósfera bastante densa. Que esté a una distancia óptima de la estrella central, o sol, para que el agua esté la mayor parte del tiempo en forma líquida, es decir, aproximadamente entre 0 y 100° C. Si la temperatura es mayor, como en el caso de Venus, el agua se evaporará y si es menor como en el caso de Marte, el agua estará en su mayor parte en forma sólida. La existencia de ciertos cambios cíclicos necesarios de temperatura y humedad son consecuencia lógica de la rotación de la Tierra alrededor de sí misma y alrededor del Sol.

Partiendo de las observaciones recientes, que indican que un 20 por 100 de las estrellas semejantes al Sol poseen planetas alrededor de las mismas con masas menores del 1 por 100 de la masa de la estrella, puede decirse que la probabilidad de existencia de vida (inteligente o no) en otro planeta como la Tierra en otros sistemas solares no es cero. Cálculos hechos anteriormente indican que dicha probabilidad varía entre un número muy bajo ($\cong 1$) y un número muy alto ($\cong 10^9$). Las nuevas observaciones, si son confirmadas, aumentarán sin duda dicha probabilidad.

20. Conclusiones y Epílogo (El ciclo de la materia y la vida)

En este trabajo no he considerado adrede el problema de la selectividad de los enantiómeros de los aminoácidos, el posible papel de varios productos poliméricos de alto peso molecular como catalizadores prebióticos, el desarrollo del código genético y otros problemas importantes de la química prebiológica. Tampoco he podido incluir los interesantes estudios acerca de los análisis de microfósiles del Precámbrico ni las teorías de evolución endosimbiótica de las células primitivas. Con el propósito de limitarme a especies moleculares bien definidas, he intentado presentar

solamente algunas pruebas experimentales obtenidas en varios laboratorios que demuestran que la mayor parte de los sillares de los ácidos nucleicos y proteínas, fosfatos ricos en energía, así como los oligonucleótidos y oligopéptidos pueden sintetizarse en ausencia de enzimas en condiciones que se supone existieron en la Tierra primitiva.

También he expuesto brevemente los conceptos preliminares que sugieren que la interacción cooperativa y sinérgica de cuatro tipos de moléculas lineales o complejos puede conducir eventualmente al ensamblaje de un sistema autoduplicativo y evolutivo. Es razonable pensar que estos conceptos e hipótesis relacionadas, serán eventualmente desarrollados en una teoría proto-simbiótica molecular del origen de la célula procariota, que pueda comprobarse experimentalmente.

Con los avances de la bioquímica y de la biología molecular es posible que la síntesis abiótica de un ser autoduplicante se logre antes de finalizar el siglo. Quizás dentro de este período también habremos recibido señales extraterrestres indicando que la vida «inteligente» existe en otros sistemas solares de otras galaxias, es decir, en otros mundos.

Cuando lleguen estos momentos, si llegan, además de las conclusiones científicas que puedan derivarse de estos estudios, creo que para nosotros tendrá mayor importancia espiritual y filosófica el reconocimiento humilde de que probablemente descendemos de moléculas sencillas, y el aceptar que posiblemente no estamos solos en el universo. Tales pensamientos deberían inculcar en nosotros la humildad y el amor entre todos, que tanto necesitamos si la raza humana ha de continuar existiendo en este planeta. A largo plazo, sin embargo, no cabe la desesperanza porque, tanto si atendemos a esta llamada cósmica como si no, el ciclo eterno de la materia y de la vida seguirá, tal como fue escrito hace mucho tiempo: *Pulvis eris et in pulverem reverteris*; o en lenguaje moderno: polvo estelar eres y al polvo estelar retornarás.

(... *Siam la mort una major naixença*. Joan Maragall.)

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

La mayor parte de las referencias específicas y generales pertinentes a las materias tratadas en este ensayo pueden encontrarse en el artículo siguiente: Oró, J. Prebiological Chemistry and the Origin of Life. A Personal Account. En: *Reflections on Biochemistry*. Editada por A. Kornberg, B. L. Horecker, L. Cornudella and J. Oró., Oxford, Pergamon Press, 1976, pág. 423-443. Véase también su traducción en: *Avances de la Bioquímica*. Editada por L. Cornudella, C. F. Heredia, A. Sols y J. Oró, Barcelona, Salvat, 1977, en prensa.