

El Estudio del Origen de la Vida sobre la Tierra y la Exploración del Sistema Solar

D. Juan Oró

Profesor Of. Biochemical & Biophysical Science

PRESENTACIÓN

POR DR. MANUEL PORTOLÉS I SANZ

En más de una ocasión todos nos hemos preguntado si existe algún tipo de vida en el llamado Espacio Exterior. La Ciencia ha ido avanzando, poco a poco desvelando posibilidades, y sin embargo todavía quedan algunos candidatos para encontrar alguna respuesta a esta pregunta (Marte, Titán, quizás Europa...). Aunque en ninguno de ellos, los científicos esperan descubrir formas de vida que sean las químicamente microscópicas.

Afortunadamente existen muchos sistemas solares en el Universo, y lo que ha ocurrido en la Tierra, la vida, podría muy bien haberse producido en otros planetas. El hombre es evidente que intenta averiguarlo, envía sondas espaciales, como Galileo, a explorar nuevos mundos y crea programas de investigación en lo que denomina bioastronomía, como el programa SETI (Búsqueda de Inteligencias Extraterrestres) para el rastreo de señales inteligentes procedentes del Espacio y el MSCA (Mega Spectrum Channel Analyzer) que escrutará mil estrellas similares a nuestro Sol en búsqueda de algún indicio de vida.

Hoy tenemos la fortuna de contar entre nosotros con Juan Oró, un explorador del Sistema Solar, uno de esos científicos que son verdaderamente sabios, y que participa desde sus comienzos, con su trabajo, en el estudio del origen de la vida sobre la Tierra y en la exploración del Sistema Solar, áreas donde es uno de los primeros espadas mundiales.



**EL DIRECTOR
DE LA REAL SOCIEDAD ECONOMICA DE AMIGOS DEL PAIS**

Se complace en invitarle al acto inaugural del Curso 1992-1993, que se celebrará el día 14 de setiembre, a las 20 horas, en el Centro Cultural de BANCAIXA, plaza de Tetuán, 23, a cargo de:

D. Juan Oró
Profesor Of. Biochemical & Biophysical Science

Sobre el tema **'EL ESTUDIO DEL ORIGEN DE LA VIDA SOBRE LA TIERRA
Y LA EXPLORACION DEL SISTEMA SOLAR'**

Colabora: BANCAJA

Valencia, setiembre 1992

Juan Oró es Licenciado en Ciencias Químicas por la Universidad de Barcelona y Doctor en Bioquímica por la Universidad de Baylor (Houston). Desde 1955 trabaja en el Departamento de Química de la Universidad de Houston, donde fundó la Unidad de Ciencias Bioquímicas y Biofísica. Ha trabajado también en el laboratorio de Radiación Lawrence de la Universidad de California en Berkeley y en el Centro de Investigación Ames de la NASA en California.

Desde 1962 ha desarrollado numerosos proyectos de investigación química relacionados con el espacio y la NASA, siendo uno de los investigadores principales para el análisis de las muestras lunares del proyecto Apolo, y también del proyecto Viking, que analizó la atmósfera y la superficie de Marte. Es miembro de varios Comités de investigación de la NASA, y de la Academia Nacional de Ciencias de los EE.UU., desde donde ha ejercido la misión de asesorar al Gobierno de este país sobre las investigaciones espaciales.

Entre los numerosos premios y distinciones que ha conseguido el Profesor Juan Oró, en su dilatada trayectoria, hay que destacar el Premio Oparin, de la Sociedad Internacional para el Estudio del Origen de la Vida (de la cual es hoy su Presidente), y el Premio Esther Fartel, la máxima distinción de la Universidad de Houston para la investigación.

A lo largo de su carrera Juan Oró ha organizado numerosos congresos internacionales sobre las licencias del espacio, la evolución química y el origen de la vida, áreas donde ha publicado más de 240 trabajos científicos y editado más de 20 libros.

En la actualidad Juan Oró compagina las tareas docentes en la Universidad de Houston, con sus proyectos de Cosmoquímica Orgánica y Posibilidades de Vida Extraterrestre en el Universo, patrocinados por la NASA. Sin más preámbulos, quiero darle la palabra al profesor Oró que hoy nos hablará sobre «El Estudio del Origen de la Vida sobre la Tierra y la Exploración del Sistema Solar».

EL ESTUDIO DEL ORIGEN DE LA VIDA SOBRE LA TIERRA Y LA EXPLORACIÓN DEL SISTEMA SOLAR

POR D. JUAN ORO

El origen de la vida es uno de los temas fundamentales que más ha preocupado al hombre desde el inicio de la historia. Hasta hace poco este tema ha sido objeto de interés más por la filosofía y la religión que por la propia ciencia. No es de extrañar, pues, que las ideas sobre esta cuestión se hayan aceptado, a menudo, sin una crítica razonable.

El estudio del origen de la vida puede enfocarse desde dos vertientes diferentes. Por un lado, se puede hacer un estudio histórico-biológico, principalmente analítico. Donde se va a la búsqueda de los restos de la vida o microfósiles en las rocas sedimentarias terrestres más antiguas, intentando determinar la naturaleza de los primeros seres vivos y las circunstancias que favorecieron su aparición. El otro enfoque que puede darse al problema del origen de la vida es de naturaleza experimental. Se trata de averiguar, en primer lugar, cuáles fueron las condiciones de nuestro planeta que hicieron posible la aparición de las primeras formas vivas, intentando después reproducirlas en el laboratorio. Son dos métodos bastante distintos, pero complementarios y compatibles que pueden ayudar a solucionar este enigma que tanto ha preocupado al hombre.

Si seguimos un planteamiento evolutivo, considerando los hechos más importantes en la evolución desde el hidrógeno al hombre, antes de discutir las condiciones de la Tierra primitiva, conviene considerar la evolución cósmica de nuestro Planeta, las fuentes primarias de donde provienen los elementos biogénicos (H, C, N, O, S, P, etc.) y las moléculas interestelares precursoras de la materia orgánica de los seres vivos.

Más del 98% de la materia del Universo está constituida por hidrógeno y helio, cerca del 1 % por neón, carbono, nitrógeno y oxígeno, y la fracción restante, menos del 1 % el conjunto de los demás elementos. La síntesis de los elementos comienza a partir del hidrógeno. Cuatro núcleos de hidrógeno, o protones, se condensan en un núcleo de helio, mediante un proceso termonuclear que tiene lugar, a una temperatura de 15 millones de grados, en el interior de las estrellas, como nuestro Sol. Se trata de un proceso energético, la base de la energía solar, que facilitó la aparición de la vida en nuestro planeta y su evolución, hace ya más de 4 mil millones de años. El carbono, sin el cual la vida terrestre no sería posible, se forma por la condensación termo nuclear de tres partículas alfa o núcleos de helio en el interior de las estrellas a temperaturas de 100 millones de grados. Procesos adicionales de captura de partículas alfa, o protones, generan la mayor parte de los otros elementos biogénicos, de los cuales provienen las moléculas interestelares más importantes y precursoras de la vida.

MOLÉCULAS INTERESTELARES

Los elementos biogénicos se combinan entre ellos al ser expulsados al exterior de las estrellas originando moléculas sencillas, cuya presencia ha sido comprobada en las nubes interestelares. La existencia de estas moléculas en el espacio interestelar y la importancia de la cosmoquímica orgánica fue anticipada por el autor en el año 1963. En 1968 se encontraron, por primera vez en nuestra galaxia, moléculas de amoníaco (NH₃) y agua (H₂O) y en 1969 de formaldehído (CH₂O). Desde entonces se han hallado unas 80 moléculas, principalmente orgánicas, en la Vía Láctea y en otras galaxias. Es bastante interesante constatar que con anterioridad a estos descubrimientos cosmoquímicos algunas de estas moléculas habían sido ya utilizadas en experimentos de síntesis abiótica de compuestos orgánicos. Destacan entre ellas las siguientes: hidrógeno, agua, amoníaco, monóxido de carbono, formaldehído, tioformaldehído, ácido cianhídrico, cianoacetileno, nitruro de fósforo y ciannamida, a partir de las cuales se pueden generar la mayoría de los compuestos bioquímicos sensoriales esenciales para la vida. Podríamos decir que el Universo es esencialmente orgánico y que está preparado para que la vida aparezca donde se den las condiciones idóneas.

FORMACIÓN DEL SISTEMA SOLAR

El Sistema Solar, del cual forma parte la Tierra, se formó por el colapso gravitacional de las nubes interestelares que constituían la nebulosa solar, mediante un proceso que no fue del todo homogéneo. Su composición probablemente dependió de las características químicas de las nubes interestelares y de las condiciones que se dieron al final de la transformación de la nebulosa en Sistema Solar. La mayor parte de los materiales constituyentes de la nebulosa solar, después de un fuerte aumento de su temperatura a causa de la onda de choque de una *supernova* y del subsecuente colapso gravitacional, se enfriaron rápidamente. Como resultado de este rápido enfriamiento, primeramente alrededor de los 1.800oK, se produjo la condensación de los silicatos líquidos y de otros materiales que formaron los cóndrulos que se encuentran incrustados en los meteoritos condriticos. A continuación se incorporaron los compuestos orgánicos que se encuentran en los diferentes planetas y satélites del Sistema Solar. Los radicales y otras combinaciones de elementos biogénicos que se formaron a altas temperaturas debían ser similares a los mismos radicales diatómicos (C₂, CN, CO, CH, NH, OH) que se observan actualmente en la atmósfera del Sol y en la cola de los cometas. 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 (alrededor de 3000K), se debieron convertir, primeramente, en moléculas similares a las que se encuentran en las nubes interestelares y, posteriormente, en moléculas más complejas como las que se encuentran en los planetas gigantes, en Titán, en una luna de Saturno, en los cometas, en los asteroides más próximos a Júpiter y en los meteoritos condriticos carbonáceos.

PLANETAS GIGANTES Y TITÁN

Los análisis espectroscópicos, principalmente en el infrarrojo, y las observaciones mediante telescopios terrestres y las naves espaciales Pioneer y Voyager, han permitido la identificación de gran número de moléculas de los elementos biogénicos en la atmósfera de los planetas gigantes y uno de sus satélites (Titán). Júpiter es el mayor planeta del Sistema Solar, con una masa 318 veces mayor que la de la Tierra, pero con una densidad de sólo 1'3 gr/cm³. Por ello se le considera representativo de la composición de la nebulosa solar. Está constituido básicamente de hidrógeno y helio, con grandes cantidades de metano y amoníaco. También se ha encontrado pero en cantidades menores; agua, hidrocarburos ligeros, monóxido de carbono, cianuro de hidrógeno, fosfamidás e incluso hidruro de germanio. La composición de la atmósfera es parecida a la de Júpiter.

El estudio de Titán, uno de los satélites de Saturno, ha sido muy interesante. En primer lugar, la presencia de atmósfera en este satélite fue descubierta en el año 1907 desde el Observatorio Fabra de Barcelona por José Comas Solá. En segundo lugar, esta atmósfera es 1'5 veces más densa que la de la Tierra y contiene, aparte de los componentes principales; nitrógeno, argón, metano e hidrógeno, una gran variedad de moléculas orgánicas volátiles como el cianuro de hidrógeno y el cianoacetileno, precursores de las bases púricas y pirimidínicas de los ácidos nucleicos de los seres vivos. Se considera que los procesos químicos que se dan en la atmósfera de Titán son, en cierta manera, parecidos a los que debieron tener lugar en la atmósfera de la Tierra primitiva antes de que aquí se formase la vida. En tercer lugar, toda la superficie del satélite está cubierta por un gran océano de metano y etano, en el fondo del cual deben existir grandes cantidades de moléculas orgánicas sólidas. La temperatura es tan baja - unos 95°K- que el agua sólo puede existir en forma sólida en el fondo de este océano.

LOS COMETAS

En el Sistema Solar, los cometas son los cuerpos más interesantes para ser estudiados desde el punto de vista de la evolución química y del origen de la vida. Los motivos fundamentales que nos llevan a esta conclusión son:

a. Contienen grandes cantidades de compuestos orgánicos que han sido detectados, en diversos observatorios, por sus espectros de emisión óptica y de microondas;

b. Los cometas son considerados los cuerpos más primitivos del Sistema solar, su materia no ha experimentado los cambios que se han dado en los planetas a lo largo de su formación (contracción gravitacional, diferenciación térmica y pérdida de volátiles);

c. Las órbitas de algunos cometas pasan cerca de la Tierra y pueden incluso travesar la órbita terrestre cuando se acercan al Sol (en su perihelio). Esto permite suponer que una cierta cantidad de materia de los cometas debe haber llegado a la Tierra, bien por choques directos o como fragmentos y partículas que se hubieran desprendido de ellos.

Un caso específico es el de la llamada catástrofe Tunguska. Se cree que ésta fue causada por la explosión de un trozo (10^{10} g) del cometa Encke, a unos 8 km de altitud, sobre un gran bosque de la región de Tunguska (Siberia), el 30 de junio del año 1908. Los árboles quedaron aplanados radialmente y, en parte, carbonizados en un área de 50 km de radio. En el subsuelo se han encontrado microdiamantes y microfibras metálicas de composición cósmica que indican un origen cometario.

Los cometas están formados por núcleos sólidos, una atmósfera o coma (constituida principalmente por radicales y moléculas gaseosas) y una cola de unos cuantos millones de km de longitud (constituida por un gas rarificado muy ionizado). Como también se han identificado diversas moléculas inorgánicas y orgánicas, no sería extraño que también se encontrasen purinas, pirimidinas y otros compuestos bioquímicos, como los que se han hallado en algunos meteoritos. Sin embargo, no hay evidencia ni justificación científica de que pueda haber vida en los cometas.

A partir del gran contenido de compuestos orgánicos se podría intuir que los cometas jugaron un papel crucial en la formación de moléculas bioquímicas en la Tierra primitiva. Así lo sugirió el autor en el año 1961 al reconocer la importancia prebiótica de la presencia del cianuro de hidrógeno y otras moléculas precursoras de compuestos bioquímicos en los cometas. En este sentido, los cometas representan la mejor conexión cósmica entre el universo y la vida de nuestro planeta.

CONDICIONES DE LA TIERRA PRIMITIVA

Se desconocen totalmente las condiciones en que se encontraba la Tierra primitiva durante sus primeros 700 millones de años ya que no han quedado señales en el registro geológico. Tampoco se tiene una evidencia directa de la composición de la atmósfera primitiva. Las consideraciones teóricas y los conocimientos de que se disponen permiten suponer que el modelo más apropiado era el de una atmósfera en un estado intermedio de oxidación o una mezcla de gases parcialmente reducidos y oxidados (en ausencia, de oxígeno libre). La comparación entre las atmósferas de los planetas terrestres sugiere que una gran parte de los elementos biogénicos debían incorporarse a la superficie, a la atmósfera y a la hidrosfera prebióticas por la colisión de cometas, meteoritos y otros cuerpos celestes con la Tierra a lo largo de los primeros 700 millones de años de su existencia.

TEORÍA DE LA FORMACIÓN DEL SISTEMA TIERRA-LUNA Y TEORÍA COMETARIA DEL ORIGEN DE LA VIDA

Este modelo de grandes colisiones primordiales se ve corroborado y unificado con la reciente teoría de A.G. W. Cameron, que ha sido contrastada con los estudios realizados mediante superordenadores. De acuerdo con esta teoría, un cuerpo celeste con la masa aproximada del planeta Marte chocó con nuestro protoplaneta, inyectando hierro en el núcleo de la Tierra y causando la fusión y eyección en órbita terrestre de la parte externa del planeta, que finalmente se agregó formando nuestro satélite natural. Así se explica la formación del sistema Tierra-Luna con todas sus peculiaridades físicas y químicas. Después de la colisión catastrófica, nuestro planeta quedó desprovisto de la casi totalidad de compuestos volátiles de la hidrosfera y de la atmósfera. Eso quiere decir que estos compuestos tuvieron que ser recuperados posteriormente mediante la captura gravitacional de cometas y otros cuerpos primitivos. Esta nueva teoría, avanzada originalmente por el autor en el año 1961, ha sido perfeccionada posteriormente. De

acuerdo con nuestros cálculos, la cantidad de materia cometaria capturada por la Tierra primitiva fue de 1023 gr., que es más de 10.000 veces superior a la masa de la biosfera actual. Como confirmación y extensión de esta teoría, cálculos más recientes indican que la masa cometaria total capturada podría llegar hasta 10^{25} gr., lo cual equivaldría a la masa de todos los océanos terrestres, hecho que es compatible con la idéntica composición isotópica (Hidrógeno/Deuterio) del agua del mar y la del cometa Halley.

Dependiendo de las velocidades y del ángulo de intersección orbital, las colisiones cometarias fueron más o menos catastróficas. En el peor de los casos las moléculas presentes en los núcleos de los cometas deben haber sido descompuestas por altas temperaturas y presiones generadas por las ondas de choque de las explosiones que resultaron. No obstante, en las condiciones anóxicas que se encontraba la atmósfera prebiótica, los radicales y moléculas excitadas producidas por la colisión deben haber formado compuestos orgánicos más complejos por procesos de recombinación. Estas conclusiones han sido confirmadas por experimentos realizados recientemente por científicos rusos. Algunas de las moléculas cometarias, como el cianuro de hidrógeno, son bastante tóxicas. Resulta aparentemente paradójico que la Tierra primitiva, al inicio de ser escenario de la aparición de la vida, se encontrase infinitamente mucho más contaminada por compuestos tóxicos para la vida que la Tierra actual.

FUENTES DE ENERGÍA

Muchos de los compuestos cometarios (formaldehído y de cianuro de hidrógeno) pueden dar lugar a la formación de moléculas bioquímicas por procesos catalíticos sin necesidad de fuentes de energía adicional. De todas formas, para que tal síntesis de compuestos bioquímicos se prolongase a un nivel sostenido («steady state») durante bastante tiempo (700 millones de años) era preciso disponer de suficiente energía de forma continuada. Esta energía debía tener diversos orígenes: radiación solar, descargas eléctricas, ondas de choque producidas por la colisión con cometas y radiaciones ionizantes provenientes del Sol. Hay que tener en cuenta que el flujo de luz ultra violeta que llegaba a la Tierra era considerablemente más importante que en la actualidad debido a la gran actividad del Sol, que entonces se encontraba en la fase inicial de evolución estelar denominada T - Tauri.

Las formas de energía más eficientes para la síntesis orgánica son las descargas eléctricas y las ondas de choque. En una primera fase, en que provocan un aumento muy alto de la temperatura, las moléculas se ionizan y se transforman en radicales libres. En una segunda fase en que se produce un enfriamiento muy rápido («quenching»), aquellos radicales e iones se recombinan y forman especies químicas nuevas muy reactivas, como por ejemplo el ácido cianhídrico, el cianoacetileno y los aldehídos.

SÍNTESIS DE BIOMONÓMEROS

La síntesis prebiótica de monómeros bioquímicos se consiguió antes de que se descubrieran las moléculas interestelares, al experimentar parte de la teoría de la evolución química de Oparin. El experimento de S.L. Miller, convertido ya en clásico, demostró la formación de diversos aminoácidos a partir de una mezcla de metano, amoníaco y agua, sometida a descargas eléctricas. Los aminoácidos se forman por condensación en fase líquida de los aldehídos y del ácido cianhídrico generado por las descargas eléctricas.

Otro experimento clave que se realizó en nuestro laboratorio demostró la formación de adenina a partir del ácido cianhídrico en presencia de hidróxido amónico. Las dificultades iniciales en la interpretación de esta síntesis compleja desaparecieron cuando se reconoció que se trataba de un proceso de polimerización progresiva de cinco moléculas de ácido cianhídrico catalizadas por una base (NH_4OH). En efecto, la fórmula empírica de la adenina $(\text{HCN})_5$, corresponde a la de un pentámero de cianuro de hidrógeno. No deja de ser una paradoja que el cianuro de hidrógeno, una de las sustancias más tóxicas para los seres vivos actuales, haya sido la generadora de una de las moléculas más importantes para la vida. Además de adenina, también se obtuvieron en nuestro laboratorio, por procesos similares, aminoácidos y las demás bases de los

ácidos nucleicos. Una vez sintetizadas las piedras fundamentales de las proteínas y de los ácidos nucleicos, la síntesis de otros monómeros bioquímicos esenciales como ribosa, nucleótidos y lípidos, no se hizo esperar. El reconocimiento de que existe un hilo evolutivo entre el cosmos y la vida terrestre, y de que no se trata de procesos arbitrarios de síntesis químicas, queda demostrado cuando, a partir de unas 10 moléculas interestelares pueden obtenerse en el laboratorio prácticamente todos los monómeros bioquímicos fundamentales.

SÍNTESIS DE BIOPOLÍMEROS

Independientemente de las condiciones de la Tierra durante la primera fase de síntesis orgánica (síntesis de biomoléculas), lo que realmente importa para llegar a comprender el origen de la vida es saber cuáles eran las condiciones en la segunda fase de síntesis orgánica, es decir la que produjo los primeros polímeros biológicos (biopolímeros o biolígmeros). Las condiciones para esta segunda fase son relativamente restringidas, al tratarse de moléculas sumamente frágiles.

Estas reacciones es preciso que se realicen en soluciones acuosas y a temperaturas moderadas (entre 0 y 70°C); es necesario a partir de concentraciones suficientes de monómeros bioquímicos y es imprescindible la presencia de un agente condensante o catalizador; el pH es preciso que esté cercano a la neutralidad y se requieren cambios cíclicos de temperatura, además de condiciones de humedad y sequedad alternantes, que permitan la evaporación del agua y faciliten la condensación de monómeros bioquímicos.

En estas condiciones, y con ayuda de la cianamida, molécula existente en el espacio interestelar y de fácil formación en la Tierra primitiva, se ha podido sintetizar oligopéptidos y oligonucleótidos en nuestro laboratorio. Mediante la cianamida, también se ha conseguido sintetizar fosfatidiletanolamina y otros fosfolípidos que son esenciales para la formación de liposomas de dos capas que equivalen a las membranas protocelulares.

Como forma de recapitulación, se puede decir que la necesidad de la existencia de agua en forma líquida y de procesos cíclicos de evaporación y condensación molecular, necesarias para que se formasen biopolímeros, determinó que esta crucial y última fase de síntesis prebiótica quedase limitada a la Tierra primitiva y, teóricamente, también a aquellos otros cuerpos celestes que hayan podido gozar de las características casi «únicas de nuestro planeta».

No se sabe todavía si estas condiciones se dieron, en algún momento pasado, en el planeta Marte en el satélite de Júpiter, Europa. Afortunadamente, se están realizando y planificando nuevas misiones espaciales a Marte y a Europa para intentar resolver estas incógnitas.

BIOPOLÍMEROS AUTORREPUCATIVOS

Una vez sintetizados los oligopéptidos y los oligonucleótidos, conviene preguntarse cuáles de estos biopolímeros van a ser más importantes para el inicio del proceso de replicación o reproducción molecular, que es uno de los procesos más característicos de la vida. En los organismos actuales, esto es el resultado de la interacción cooperativa de moléculas informacionales (DNA, RNA) y catalíticas o enzimáticas (polimerasas).

Estudios recientes hechos por el profesor Thomas Cech y sus colaboradores indican que ciertos tipos de RNA tienen, no sólo la capacidad informacional, sino también la catalítica de formar e hidrolizar ácidos nucleicos. Se trata de los denominados ribozimas derivados del intrón autoentrelazador del RNA ribosomal de *Tetrahymena*, y de otros organismos. Estos tipos de RNA se consideran como si fuesen replicasas o polimerasas de RNA primitivo ya que en la presencia de pentacitidilatos pueden dar lugar a la síntesis de oligocitidilatos de mayor grado de polimerización. Se cree que la parte activa catalítica de este RNA reside en el grupo guanosina terminal del RNA ribosomal de *Tetrahymena*, si bien esto, no se ha demostrado en condiciones prebióticas.

MOLÉCULAS Y ASOCIACIONES PROTONUCLEARES FUNDAMENTALES

El paso más complicado y, a la vez, menos conocido de la cadena evolutiva es aquel que se va a originar la primera molécula con la capacidad de autorreplicación. Tan pronto se formaron estos primeros sistemas moleculares autorreplicativos, probablemente se dieron una serie de procesos catalíticos y de autoorganización estructural. Llegar a resolver cómo se produce equivaldría a conocer cuál fue el proceso de aparición de la primera célula ancestral con capacidad autopoyética, hecho que puede considerarse como el acontecimiento más importante de la historia del Universo, marcando el paso de la no vida a la vida.

No se sabe si las asociaciones cooperativas de biopolímeros sintetizados de manera no enzimática pueden proporcionar base suficiente para originar la célula procariótica, si bien la transición evolutiva del nivel molecular al celular se podría explicar con la aparición subsecuente interacción cooperativa de las siguientes moléculas protocelulares fundamentales:

1. RNA autorreplicativo codificador. Proto-RNA con capacidad catalítica (tipo ribozima) y capaz de formar complejos con otros oligonucleótidos complementarios.

2. Molécula híbrida traductora del código. Proto-AA-tRNA, con capacidad de formar estructuras intermoleculares y dar lugar a la formación de péptidos.

3 Péptido biocatalítico. Protoenzima. Pequeños péptidos lineales formados a partir de distintos proto-AA-tRNA, de cuatro o más unidades de longitud, con aminoácidos funcionales como la arginina, histidina, serina, ácido aspártico, etc., y con capacidad catalítica.

4. Proto-membrana. Sistema de moléculas artificiales (fosfolípidos) con capacidad de formar una estructura liposómica para separar la fase protocelular interna del Medio Ambiente externo. Moléculas prebióticas como la fosfatidilcolina forman, espontáneamente, asociaciones liposómicas reversibles con una gran capacidad de encapsulación molecular.

UN MODELO DE EVOLUCIÓN PROTOCELULAR

Los cuatro tipos de moléculas protocelular fundamentales muestran los atributos más esenciales de la vida. Es lógico suponer que debían formar parte de una célula ancestral. Desconocemos, sin embargo, el camino más probable para llegar al autoensamblaje o integración de estas biomoléculas en una entidad celular funcional. Sugerimos a continuación uno de los posibles caminos suponiendo que la evolución protocelular se dio en tres fases de progresiva complejidad.

1ª fase. Formación y encapsulación de los RNA catalíticos

Protocélulas de RNA. La capacidad polimerizante y autorreplicativa de los RNA catalíticos o ribozimas (Proto-RNA-cat.) permite considerar que la función de estas moléculas fue una de las más primarias en el origen de la vida. La encapsulación de estos riboenzimas considerados como replicasas, dentro de un liposoma en la presencia de los sustratos adecuados, harían posible una síntesis más rápida del RNA autorreplicativo, proceso que induciría, debido al crecimiento interno, a la subdivisión de la entidad liposómica. Podríamos decir que esta entidad autopoyética es una protocélula de RNA, en teoría una de las formas más primitivas de vida.

2ª fase. Desarrollo del proceso de producción

Protocélula de RNA + protoenzimas. La formación del RNA traductor (proto-AA-tRNA) requiere la presencia de aminoácidos y oligonucleótidos. Cuando algunos de los péptidos en presencia del proto-RNA resultase ser un protoenzima que catalizase con mayor intensidad la síntesis de nuevas moléculas de proto-RNA, entonces empezaría un proceso autocatalítico entre los tres tipos de moléculas fundamentales dentro del liposoma. Este proceso de autocatálisis cooperativa entre el proto-RNA, los proto-AA-tRNA y los protoenzimas es sin duda el proceso cibernético y autororganizador más característico de la vida. Se trataría de una entidad liposómica con intensa capacidad autopoyética sometida a la acción dinámica de la evolución darwiniana. La existencia de protocélulas con estas características probablemente duró hasta que finalmente apareció el proto-DNA.

3ª fase. Última fase de evolución protocelular

Protocélula ancestral de DNA. Con la introducción de una molécula informacional más estable (proto-DNA) que tiene una capacidad codificadora de máxima fidelidad, y con el perfeccionamiento del proceso de traducción mediante los protorribosomas, la evolución protocelular llegaría al más alto nivel de perfeccionamiento. Así debió aparecer la protocélula ancestral de todos los seres vivos actuales.

TRANSICIÓN EVOLUTIVA DEL RNA AL DNA

La aparición de la doble hélice de DNA como una macromolécula informacional en las células de RNA se explica sobre la base de previsiones darvinianas selectivas que debían favorecer una mayor estabilidad y fidelidad de la información genética. Entre los argumentos que indican que el RNA fue la primera molécula genética figuran los siguientes:

1. Las propiedades catalíticas y autocatalíticas de RNA que no se encuentran en el DNA; 2. El hecho de que la mayor parte de los coenzimas son derivados de los ribonucleótidos y no de los desoxirribonucleótidos; y 3. La síntesis de los desoxirribonucleótidos siempre procede de la reducción enzimática de los ribonucleótidos, no dándose nunca el proceso inverso.

Por otro lado, las protocélulas basadas en RNA como una molécula genética tenían grandes inconvenientes que debieron inducir y facilitar la transición evolutiva del RNA al DNA. Los argumentos más importantes son los siguientes:

1. La cadena del polímero de 2'desoxirribosa (DNA) es más estable que la del polímero de la ribosa (RNA), principalmente en soluciones acuosas en presencia de iones Zn; 2. La ausencia de enzimas correctores de las mutaciones del RNA introduce un nivel de mutaciones mucho más elevado en el genoma de RNA que en el de DNA; 3. La información genética en el RNA es degradada más fácilmente que en el DNA, como es el hecho de que la citosina es propensa a hidrolizarse a uracilo, cosa que no puede pasar en el caso de la timina del DNA; 4. Como la irradiación por luz ultravioleta (UV) produce un gran número de mutaciones, la ausencia de atenuación por falta de oxígeno y ozono en la atmósfera en la Tierra primitiva impuso una intensa presión selectiva que favoreció la implantación de la doble hélice de DNA, que es mucho más estable en las mismas condiciones.

EVOLUCIÓN BIOLÓGICA PRIMIGENIA

De acuerdo con lo que acabamos de decir, es muy posible que las primeras células realmente competitivas fuesen algo parecidas a pequeñas bolsas membranosas que debían contener agua, ácidos nucleicos (RNA y DNA), enzimas proteínicos solubles y ribosomas. Actualmente existen bacterias de un tipo similar con capacidad de sintetizar los propios componentes celulares. Además, hay bacterias cuya información genética es insuficiente para sintetizar todas las moléculas que necesitan para su metabolismo y es preciso que las obtengan a través de la alimentación. De la misma manera, la primera fase de la vida en la Tierra se basa en la alimentación a partir de la sopa prebiótica. Incluso la energía debía obtenerla directamente «tragando» ATP y otros compuestos energéticos. Al aumentar la población celular, las reservas energéticas se agotaron; Entonces se desarrollaron mecanismos para la producción de energía dentro de la misma célula; probablemente el primero de ellos fue la fermentación.

Los productos finales de la fermentación todavía contienen energía. Esto hizo que se desarrollaran otros microorganismos capaces de aprovechar aquellos productos, iniciando así una cadena trófica y fermentadora, que todavía encontramos hoy en día en zonas de muelles y sedimentos lacustres. Posteriormente, se originaron otras estrategias metabólicas, todas ellas anaeróbicas, como la fijación de CO₂ por los metanógenos, la fotosíntesis anaeróbica de las bacterias rojas y verdes, la reducción del sulfato por el hidrógeno y la desproporción de los compuestos de azufre con bacterias quimiolitotróficas.

POSIBILIDAD DE VIDA MÁS ALLÁ DE LA TIERRA

Sistema Solar

Los análisis hechos «in situ» del material de la superficie de Marte, indican la ausencia de materia orgánica. Sin embargo, no se puede descartar que, en su pasado remoto, haya habido materia orgánica e incluso vida., si se tiene en cuenta la existencia de agua líquida y de unas condiciones climatológicas más benignas durante los primeros 700 millones de años de existencia del planeta rojo. Ésta fue una de las principales razones para el lanzamiento, que tuvo lugar en julio de 1988, de las naves espaciales soviéticas hacia Fobos y Marte. Aunque sólo una de estas naves tuvo éxito parcial al analizar desde su órbita el planeta Marte, la probabilidad de que existan compuestos orgánicos de Fobos es elevada. Además, la posibilidad de que haya materia orgánica en Marte en sedimentos *antiguos* enterrados a cierta profundidad no es descartable aunque la posibilidad de que haya materia orgánica en Marte en sedimentos antiguos enterrados a cierta profundidad no es descartable aunque la posibilidad de que se encuentren microfósiles es mucho más remota.

El otro cuerpo de interés exobiológico es Europa, satélite de Júpiter, que tiene una superficie recubierta por una gran capa de hielo, debajo de la cual se cree que existe un océano con agua líquida a temperatura de 4°C. Siendo la densidad del satélite de 3g/cm³ y su composición parecida a los meteoritos carbonáceos, es altamente probable que en este océano subterráneo existan grandes cantidades de materia orgánica. La posibilidad de existencia de vida es mucho más hipotética. Si se tiene en cuenta que las posibilidades de que haya vida en otros planetas o satélites son todavía más reducidas, podemos decir que en el Sistema Solar sólo tenemos evidencia de existencia de vida en la Tierra. Como hemos dicho antes, convendría completar las misiones a Marte (1992, 1994) Y a Europa para dilucidar toda esta cuestión. La reciente declaración del Presidente de los Estados Unidos sobre el viaje tripulado a Marte en el año 2020 abre nuevas esperanzas.

Más allá del Sistema Solar

Para encontrar un cuerpo celeste con vida alrededor de otras estrellas, se requiere que se cumplan gran número de condiciones. Las más importantes son:

a. Que haya una sola estrella central de masa comparable a la del Sol, con una media de vida de 5.000 millones de años y que tenga alrededor un sistema planetario con diversos planetas más pequeños que Júpiter.

b. Uno de estos planetas tendría que tener una masa suficiente para retener las moléculas volátiles y formar un océano acuoso y una atmósfera lo bastante densa. Estas dos fases tendrían que lindar con una fase sólida (litosfera).

c. Los compuestos de los elementos biogénicos tendrían que formar parte de la composición química de la atmósfera y de la hidrosfera.

d. Se necesitaría que este planeta se encontrara a una distancia óptima de la estrella central y que recibiese una cantidad de energía suficiente para que el agua se encontrara la mayor parte del tiempo en forma líquida, es decir, entre 0 y 100° C.

Así pues, fuera del Sistema Solar, se puede pensar que hay una cierta probabilidad de vida (que podría ser inteligente o no) en planetas parecidos a la Tierra, en otros lugares de la Vía Láctea. Mediante un telescopio con detectores de infrarrojos y provisto de una pantalla coronográfica, se ha demostrado la presencia, por primera vez, de un disco de tipo cometario alrededor de la estrella *beta*-Pictoris. También se ha encontrado un disco parecido alrededor de la estrella H.L. Tauri. Si se tiene en cuenta la importancia de los cometas en la aparición de la vida, estas observaciones aumentan las probabilidades de existencia de vida más allá del Sistema Solar. De todas formas, queda por demostrar de una forma definitiva la existencia de planetas más allá del Sistema Solar. Puede que exista un planeta con vida inteligente por cada diez millones de estrellas de nuestra galaxia.

LA EVOLUCIÓN QUÍMICA y EL ORIGEN DE LA VIDA

Observaciones del espacio cósmico, de la Tierra y experimentos de laboratorio realizados durante las cuatro décadas anteriores apoyan la hipótesis de la evolución química como explicación científica del origen de la vida en la Tierra. A grandes rasgos, este proceso de evolución tuvo lugar en dos grandes períodos (A: evolución química y B: evolución proto-biológica), divido cada uno de ellos en tres fases principales:

A. Evolución química

1. *Elementos biogénicos y moléculas interestelares.* Los elementos biogénicos y las moléculas interestelares formados de estos elementos provienen de las estrellas. Sin la síntesis termonuclear de carbono (paradójicamente de baja probabilidad relativa), no sería posible la vida en el Universo.

2. *Monómeros bioquímicos.* En los cometas, en los planetas gigantes y en sus satélites, en los asteroides oscuros y en los meteoritos carbonáceos, se encuentran, parcialmente transformadas, la mayor parte de las moléculas interestelares precursoras de los monómeros bioquímicos. En algunos de estos cuerpos celestes (cometas y meteoritos carbonáceos), se han encontrado monómeros bioquímicos, como aminoácidos y purinas.

3. *Biopolímeros y Liposomas.* El paso de la evolución química más importante es el que tuvo lugar en la Tierra primitiva, donde los biomonómeros se transformaron en biopolímeros en presencia de agua líquida gracias a procesos de evaporación y condensación. Sin la aportación de materia orgánica a la Tierra primitiva por parte de los cometas, es muy probable que no hubiese sido posible la aparición de la vida en la Tierra.

B. Evolución Protobiológica (Protocelular)

El aspecto más desconocido del origen de la vida en la Tierra es la evolución protobiológica que, de forma hipotética, puede dividirse en las tres fases siguientes:

1. *Protocélula de RNA.* Esta protocélula se generó tan pronto como los biopolímeros de proto-RNA con capacidad catalítica de síntesis (oligonucleotídica) fueron encapsulados en unos liposomas.

2. *Protocélula de RNA y protoenzimas.* La adaptabilidad catalítica del RNA hizo posible la generación de moléculas híbridas entre los aminoácidos y el RNA (proto-AA-tRNA). Estas moléculas interaccionando con el RNA codificador (y a la vez ribozimático) dieron lugar a la formación de los primeros protoenzimas. Así se inició un proceso de autocatálisis cooperativo entre el RNA informacional y los péptidos enzimáticos, que es lo más característico de la vida.

3. *Protocélula ancestral (DNA, etc.).* La protocélula anterior llegó a la máxima perfección con la transición del RNA al DNA como molécula genética más estable y de más alta fidelidad de la síntesis de proteínas.

Sólo nos queda por decir que con los avances actuales de la bioquímica y de la biología molecular es muy posible que, antes de terminar este siglo, se consiga la síntesis abiótica de un ser autoduplicante. Quizás entonces también habremos recibido señales indicando la existencia de vida «inteligente» extraterrestre.

Si llega este momento tendremos que reconocer que posiblemente descendemos de moléculas sencillas y que por tanto es muy posible que no estemos solos en el Universo. Esta reflexión tendría que hacernos sentir humildes y tendría que inculcarnos amor por el resto de la humanidad (terráquea y, si existe, también galáctica) si queremos que la especie humana continúe existiendo en el planeta. A largo plazo, sin embargo, no hay otro motivo para ser pesimistas. Suceda lo que suceda, y aunque el hombre llegase a desaparecer, el ciclo eterno de la materia de la vida continuará, tal como fue escrito ya hace mucho tiempo: «Pulvis es et in pulverem reverteris».