

Este artículo apareció publicado en el Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid para el año 1997. Su apariencia puede haber cambiado al ser reprocesado con pdflatex y nuevos ficheros de estilo.

EL ORIGEN DE LA VIDA

Jesús Martín-Pintado Martín

Observatorio Astronómico Nacional (IGN)

Apartado 1143. 28800 Alcalá de Henares

Estando escribiendo este artículo aparecieron en la revista *Science* dos artículos que pueden ser de gran importancia para entender cómo apareció la vida en la Tierra y cómo ésta evolucionó desde sus formas simples a otras más complejas. El primero de estos artículos, con gran repercusión en la prensa, escrito por un grupo de científicos de la Agencia Espacial Americana (NASA), concluye que en un meteorito de origen marciano caído en la Antártida hace 13000 años existen restos fósiles que indican que en Marte pudo haber vida hace unos 3500 millones de años. A la semana siguiente, en el otro artículo, un nutrido grupo de biólogos dió a conocer los resultados de los análisis efectuados de un gran número de genes de un organismo extraído en 1982 de una fuente termal a 3 kilómetros de profundidad en el océano Pacífico. Este microorganismo unicelular vive en ambientes desprovistos de oxígeno (anaerobios). Se le ha bautizado como “arqueobacteria”, perteneciente al reino o dominio *Arquea*. El análisis de su genoma ha aportado una valiosísima información que permite imaginar cómo fue la forma de vida que apareció sobre la Tierra hace unos 3600 millones de años. En algunos aspectos las arqueobacterias tienen características típicas de organismos superiores (eucariotas), pero en muchos otros se parecen a las bacterias (procariotas). Por lo tanto, las arqueobacterias podrían descender del largamente postulado “antecesor procariota” de los eucariotas.

Los artículos científicos citados son una muestra de que el estudio del origen de la vida es un tema candente en el que se sigue avanzando. En el presente artículo haremos una breve reseña de los logros realizados en esta disciplina en los últimos años, así como las principales dificultades con que se encuentran todas las hipótesis avanzadas para explicar el origen de la vida en nuestro planeta.

La generación espontánea

Hasta la mitad del siglo XVII el origen de la vida estaba resuelto. Dios había creado el hombre y los organismos superiores, mientras que los insectos, ranas y demás criaturas pequeñas aparecían por generación

espontánea en el fango o en materia en descomposición. Esta idea se remonta a los tiempos de Babilonia, de la China antigua y la Grecia clásica. El filósofo francés René Descartes propuso que la aparición de la vida era el resultado del calor que agita las partículas en putrefacción. En el siglo XVI, el eminente químico y biólogo Van Helmont llegó a publicar una receta para generar ratones a partir de trapos viejos y un poco de trigo.

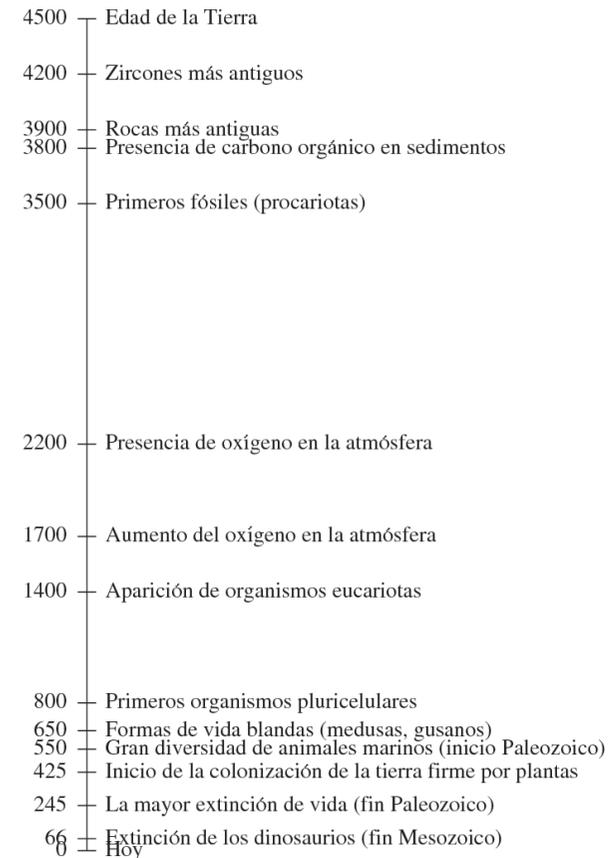
La idea de la generación espontánea zozobra en el siglo XVII cuando el médico italiano Francesco Redi demuestra que las moscas no aparecen por generación espontánea, sino que se reproducen a partir de progenitores. Por fin, la idea de la generación espontánea sucumbe a mediados del siglo XIX cuando Louis Pasteur demuestra que incluso las bacterias y otros microorganismos provienen de progenitores similares ellos. Asimismo, Pasteur plantea, por primera vez, el problema de la creación de la primera generación de cada especie. En 1859, Charles Darwin propone que la selección natural, actuando generación tras generación, puede explicar la evolución de organismos simples a más complejos. Esto implica que todas las especies provendrían de un único progenitor muy simple. Aunque en su libro *El origen de las especies* Darwin escribe que fue el Creador el que inspiró la vida en algunas formas simples, en escritos privados ya apunta la posibilidad de que la vida surgiera de un proceso químico en una charca caliente en presencia de luz, calor, electricidad y de todo tipo de sales de amoníaco, ácido fosfórico, etc.

Durante el siglo XX las investigaciones en geología, biología, química y astronomía sobre el origen de la vida se han encaminado a desentrañar de qué manera las reacciones químicas entre moléculas simples han conducido a la formación de la vida en la Tierra.

Evolución de la vida en la Tierra

Los registros fósiles avalan la idea de que la vida evolucionó desde formas sencillas a formas más complejas. Así, la presencia de vida multicelular data de hace unos 600–800 millones de años; en el Cámbrico (hace unos 550 millones de años) se produce una “gran explosión de formas de vida” que conduce al diseño de todos los planes de organización anatómica que hoy conocemos. Las razones por las que se produce esta explosión no han sido aún desveladas pero podrían estar relacionadas con el aumento de ciertos elementos como el calcio y el fósforo en los océanos y la acumulación del oxígeno en la atmósfera. De hecho, la evolución de la vida en la Tierra parece estar asimismo ligada a grandes extinciones de especies. (Recordemos la célebre extinción de los dinosaurios entre el Cretácico y el Terciario hace 65 millones de años y la aún más dramática extinción

del 95 % de las especies marinas entre el Pérmico y el Triásico, hace 245 millones de años.)



A medida que miramos a tiempos más remotos la vida se vuelve más simple. Se ha llegado a identificar fósiles que datan de hace unos 3 500 millones de años. Los fósiles de hace más de 800 millones de años muestran que la vida era extremadamente simple, constituida fundamentalmente por organismos unicelulares. Según estos registros, la primeras células eucariotas, similares a las que componen nuestro organismo (con núcleo conteniendo el material genético, mitocondrias, etc), aparecieron hace aproximadamente unos 1 200 millones de años. El descubrimiento de organismos como la arqueobacteria servirán para comprender cómo se evolucionó hasta la célula eucariota.

Los registros de fósiles de microorganismos con células procariotas (sin núcleo y con un sistema de replicación menos fiel que el de los eucariotas), similares a las de las bacterias de hoy día, se remontan hasta hace unos 3500 millones de años. Incluso el análisis de la composición isotópica de las rocas más antiguas encontradas en la Tierra sitúa el origen de la vida hace unos 3800 millones de años. La actividad geológica ha destruido todo rastro de vida anterior, por lo que es posible que la vida empezara incluso mucho antes.

Teniendo en cuenta que la superficie de la Tierra fue un lugar inhóspito para la vida debido al fuerte bombardeo de meteoritos y de cometas a la que estuvo sometida hasta hace unos 4000 millones de años, se concluye que la vida “agarró” en la Tierra a la primera oportunidad que se le presentó.

Examinaremos brevemente a continuación cuáles son los componentes químicos básicos que constituyen un ser vivo, así como los procesos que tiene lugar en él.

La complejidad de la vida

Aunque los organismos que aparecieron en los albores de la Tierra eran extremadamente simples, de tipo unicelular y procariotas, éstos estaban ya dotados de factorías químicas que les permitían realizar las complejas funciones propias de la vida como son el metabolismo y la autorreplicación. Así por ejemplo, es razonable pensar que la vida primitiva tendría un gran parecido con los organismos más pequeños y “simples” que se conocen en la Tierra: los micoplasmas. Aunque los virus son más pequeños y simples que tales bacterias, éstos no se consideran como seres autónomos ya que funcionan como organismos parciales e incompletos necesitando infectar a otros organismos para su reproducción. Así pues, analizaremos brevemente estas minúsculas bacterias.

Los micoplasmas están compuestos por una célula de tan sólo algunas décimas de micra de tamaño. Poseen membrana celular, todo el sistema para sintetizar las proteínas (ribosomas), el material genético (contenido en los ácidos desoxirribonucleicos -ADN- y ribonucleicos -ARN-) y un gran número de enzimas. Una bacteria contiene más de 100 millones de átomos agrupados en compuestos de gran complejidad que juegan papeles fundamentales en su existencia. A grandes rasgos estos compuestos son: las grasas, los hidratos de carbono, las proteínas y los ácidos nucleicos (ADN y ARN). Las grasas sirven como membrana de separación con el medio exterior y delimitan la factoría donde tiene lugar la química biológica. La membrana celular posee unas “puertas” de proteínas que controlan el trasiego de alimento (por ejemplo moléculas de glucosa) desde el exterior

al interior. La glucosa en el interior de la célula es convertida por las enzimas en energía generando dióxido de carbono y agua. Esta energía se utiliza para fabricar nuevas proteínas en el ribosoma siguiendo los “planos” contenidos en el ARN mensajero y que, a su vez, han sido copiados a partir de tramos del ADN (los genes). La replicación de la célula se produce de manera similar a la descrita anteriormente para la fabricación de proteínas, pero en este caso se hace una copia de **todos** los genes contenidos en el ADN. En este proceso fundamental descrito brevemente intervienen un gran número de enzimas, proteínas y ácidos nucleicos.

Los componentes fundamentales involucrados en las reacciones bioquímicas son, asimismo, de extraordinaria complejidad. Así por ejemplo, las proteínas son macromoléculas de entre mil y diez mil átomos formadas por secuencias lineales de aminoácidos. Sorprendentemente, en la formación de las proteínas sólo intervienen veinte aminoácidos de entre los miles que se conocen en química. Hay que resaltar que mientras las bacterias son capaces de producir los veinte aminoácidos, los seres humanos sólo sintetizamos una decena y los demás debemos ingerirlos. Por su parte, el ADN, que contiene la información genética de la célula, está compuesto por dos cadenas o hebras de moléculas que se enroscan entre sí en una doble hélice de más de 10 millones de átomos. Las unidades básicas de los ácidos nucleicos (ADN y ARN) son los nucleótidos, compuestos mucho más complejos que los aminoácidos. Por tanto, la aparición del primer organismo supuso un alto grado de organización de la materia prebiótica (anterior a la aparición del primer ser vivo) en macromoléculas muy específicas.

Afortunadamente, los procesos bioquímicos de síntesis de proteínas y de duplicación de ácidos nucleicos exigen un número relativamente pequeño de moléculas orgánicas básicas. Los mismos veinte aminoácidos aparecen en las proteínas de todos los organismos. Los ácidos nucleicos aislados de cada célula contienen los mismos azúcares y el mismo grupo de bases nitrogenadas. Por tanto, la formación de la vida requiere que a partir de sustancias inorgánicas se sintetice, en condiciones prebióticas, un conjunto relativamente pequeño de moléculas clave (aminoácidos, ácidos nucleicos, ...).

Generación al azar. La panspermia

Aunque sea volver a resucitar la teoría de la generación espontánea bajo un nuevo enfoque, un posible origen de la vida es que ésta se produjera por azar. George Wald analizó la posibilidad de que el primer organismo se generara al azar por reacciones químicas. El argumento esgrimido es que un hecho improbable se convierte en probable si el tiempo es sufi-

cientemente largo para permitir un gran número de ensayos. Sin embargo, la probabilidad de formar incluso un subconjunto de los compuestos que forman una bacteria es demasiado baja. Fred Hoyle y N. C. Wickramasinghe han estimado la probabilidad de formar un conjunto de las enzimas presentes en una bacteria partiendo ya de los 20 aminoácidos que forman las proteínas. Los resultados de estos cálculos y otras estimaciones indican que la probabilidad de este proceso es ínfima.

Por esta razón, Hoyle y Wickramasinghe han avanzado la hipótesis de la panspermia. Esta consiste en suponer que la vida no se generó en la Tierra a partir de material inorgánico, sino en otro lugar del Universo y después infectó la Tierra en forma de esporas bacterianas. Aunque la hipótesis tiene cierto tono místico, la idea de que la vida se originó en otra parte del Universo no es irrazonable en sí misma.

La teoría de la panspermia necesita que la primera célula que llegó a la Tierra, viajando desde el planeta donde se originó, estuviera protegida dentro de un meteorito que fue arrancado de dicho planeta. Esta hipótesis explicaría la sorprendente universalidad del código genético de la vida en la Tierra: simplemente toda la vida procedería del mismo ancestro. La posible existencia de vida en Marte hace 3600 millones de años como han propuesto los científicos de la NASA hace suponer, si el origen fuera la panspermia, que el sistema solar estuvo sometido a un fuerte bombardeo de meteoritos provenientes de lugares lejanos de la galaxia, lo cual es altamente improbable. Por tanto, parece mucho más probable que la universalidad del código genético se deba a la evolución de la vida en la propia Tierra.

Analicemos ahora los modelos que postulan que la vida se desarrolló en la Tierra a partir de reacciones químicas de moléculas inorgánicas simples.

La atmósfera terrestre primitiva

Si la vida se generó a partir de una sopa prebiótica que contenía los ingredientes necesarios para la vida, necesitamos establecer los pasos que llevaron a que en esta mezcla apareciera el primer organismo vivo. El proceso es el mismo independientemente del lugar donde este proceso ocurra (la Tierra o cualquier otro lugar del Universo). El primer problema con el que nos encontramos en el caso de la Tierra es el de establecer las condiciones que reinaban en la época prebiótica. La formación de la atmósfera juega un papel clave en la aparición de la vida ya que ésta permitió la formación de los océanos y lagos y condicionó los compuestos que en ellos se disolvieron.

La importancia de la composición de la atmósfera prebiótica fue puesta de manifiesto por el biólogo ruso Aleksandr I. Oparin en 1924 quien

avanzó la primera teoría sobre el origen de la vida en una sopa caliente y diluida. Oparin aduce, de manera general, el carácter reductor (rica en hidrógeno) que tuvo que tener la atmósfera de la Tierra primitiva para que permitiera la síntesis de moléculas bioquímicas en un mar de compuestos orgánicos. Paradójicamente, la atmósfera actual, con su alta concentración de oxígeno (21%) que le confiere su carácter oxidante, es vital para los procesos de todas las células en los organismos superiores pero hubiera sido letal para los primeros organismos que aparecieron en la Tierra. Por tanto, según Oparin la Tierra debía tener una atmósfera completamente distinta a la actual. Los grandes planetas exteriores del sistema solar contienen atmósferas reductoras; al ser éstas menos evolucionadas, podemos suponer que vagamente muestran el estado de la atmósfera terrestre más primitiva. En efecto, el registro petrográfico avala que la atmósfera no siempre fue tan rica en oxígeno como lo es en la actualidad. Hace unos 2000 millones de años se produjeron cambios en la naturaleza de los minerales depositados en las rocas que parecen estar relacionados con la aparición de cantidades apreciables de oxígeno en la atmósfera.

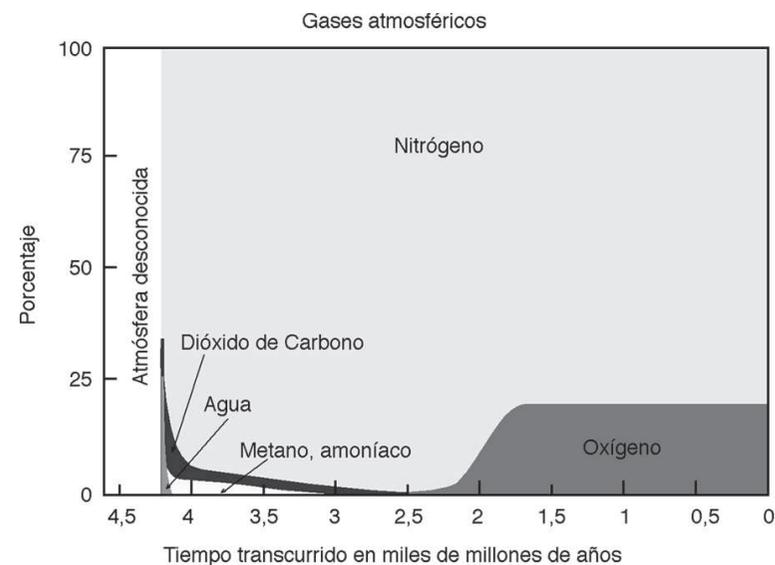


Figura 2: Evolución de la composición química de la atmósfera terrestre.

Como se ha mencionado anteriormente, la Tierra estuvo sometida a un intenso bombardeo de meteoritos y cometas durante 120–150 millones

de años después de su formación. La fuerza de la gravedad y la energía liberada por la radioactividad y por los grandes impactos de los cuerpos que embistieron a la Tierra produjeron un inmenso calor en su interior que dio lugar a la estructura interna de la Tierra. El horno resultante situado a 200–400 km bajo tierra (conocido como el océano de magma) estuvo activo durante millones de años dando lugar a erupciones volcánicas. Es en esta época cuando la atmósfera terrestre primitiva se formó con apenas vestigios de oxígeno.

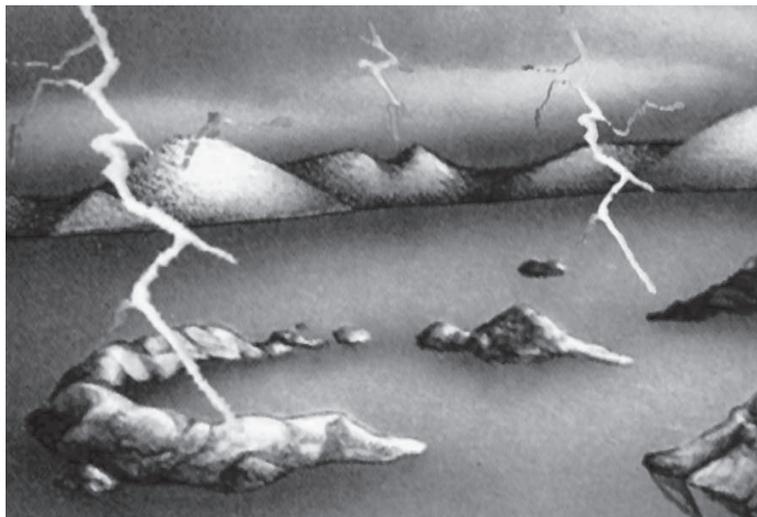


Figura 3: Representación del aspecto de la superficie terrestre tras la formación de los mares.

Existe, sin embargo, una gran discrepancia sobre el carácter reductor de la misma. Mientras que unos piensan que la atmósfera contenía compuestos muy reducidos como metano, amoníaco y agua, otros defienden que si los gases expulsados por los volcanes hace 4000 millones de años eran similares a los que expulsan los actuales, la atmósfera primitiva debía ser fundamentalmente neutra. Esta contendría nitrógeno, dióxido de carbono y agua, con pequeñas cantidades de otras sustancias como metano, dióxido de azufre, ácido clorhídrico y amoníaco. En cualquiera de los dos escenarios, una vez que se liberó suficiente vapor de agua, éste se condensó y dio lugar a los ríos, lagos y mares.

A continuación veremos cómo el carácter reductor o neutro de la atmósfera juega un papel fundamental a la hora de establecer la síntesis prebiótica que se origina a partir de elementos simples.

Química prebiótica experimental

Sin lugar a dudas, los experimentos de laboratorio encaminados a establecer los caminos seguidos en la síntesis de las moléculas biológicas fundamentales (aminoácidos, nucleótidos, proteínas, enzimas, hidratos de carbono, ácidos nucleicos, etc.) a partir de material inorgánico han jugado un papel fundamental a la hora de establecer los modelos para comprender el origen de la vida.

Síntesis de los aminoácidos

Basándose en las ideas de Oparin y Haldane, Stanley Miller y Harold Urey efectuaron, en 1953, un experimento que ha tenido hondas repercusiones en las ideas científicas sobre el origen de la vida y que marcó el inicio de la química prebiótica experimental. En este experimento se simuló las condiciones de la atmósfera prebiótica a fin de imaginar las posibles reacciones que ocurrieron en la Tierra primitiva. Para ello se utilizaron dos matraces unidos entre sí. En la parte inferior de uno de los matraces se colocó agua (océano) que se calentó haciendo circular el vapor de agua por el segundo matraz (ciclo hidrológico) en el que se simuló una atmósfera reductora rica en metano (CH_4), amoníaco (NH_3) e hidrógeno (H_2). A esta mezcla de gases se le aplicó unos electrodos que producían una descarga eléctrica continua (relampagueo). Los productos solubles producidos en las reacciones que tenían lugar en la “atmósfera” se recogían en un recipiente donde se condensaba el vapor de agua. Transcurridos varios días de continuas descargas se analizó el contenido del “océano”. El 85 % del material recogido era alquitrán. El 15 % restante lo componían pequeñas cantidades de otras sustancias. Los compuestos más abundantes después del alquitrán, con porcentajes entre 4 y 1,6 %, eran los ácidos carboxílicos. El más abundante fue el ácido fórmico (CHOOH) con una concentración del 4 %.

Lo más notable del experimento fue la producción de aminoácidos. De los trece elementos más abundantes obtenidos, seis de ellos eran aminoácidos. Pero no todos los aminoácidos tienen importancia para la vida. De los seis detectados sólo los dos más simples (la glicina y la alanina) eran del tipo adecuado. La glicina se había formado al calentar formaldehído (H_2CO) y cianuro de hidrógeno (HCN) en una disolución acuosa de amoníaco (NH_3). Por tanto, Miller y Urey demostraron que los elementos necesarios para la formación de los aminoácidos, el cianuro de hidrógeno y el formaldehído, se formaban mediante descargas en un medio reductor y que las demás reacciones se producían en la disolución acuosa de amoníaco.

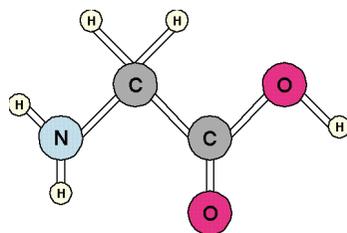


Figura 4: Esquema de la glicina, aminoácido presente en meteoritos y producido en el experimento de Miller-Urey.

La sencillez del experimento de Miller-Urey y la elevada concentración de algunos compuestos biológicos específicos producidos en un número limitado de reacciones demuestran que el primer paso en el origen de la vida no fue un suceso fortuito. Desde el primer experimento de Miller-Urey, casi todos los aminoácidos que existen de forma natural han sido sintetizados, en mayor o menor grado, en experimentos de síntesis prebióticas. Así mismo, se ha demostrado que los aminoácidos se forman siempre que una mezcla reductora se calienta suficientemente y se irradia con luz ultravioleta o se somete a una descarga eléctrica, independientemente de la naturaleza de los compuestos iniciales.

Sin embargo, a pesar de haberse realizado un gran número de experimentos de este tipo, en ninguno de ellos se han producido otros compuestos biológicos fundamentales como los glucósidos (combinaciones de base nitrogenada y azúcar que forman parte de los nucleótidos), los azúcares o alguno de los elementos que forman las grasas. Por tanto, el resultado del experimento de Miller-Urey dista mucho de la naturaleza de una bacteria e incluso de la de un virus

Síntesis de los nucleótidos

El siguiente desarrollo importante en la química prebiótica fue el experimento realizado por un investigador español. Juan Oro calentó durante algunos días una mezcla con sólo cianuro de hidrógeno y amoníaco en una disolución acuosa y observó que se formaban aminoácidos similares a los descubiertos en el experimento de Miller-Urey, pero además encontró que un compuesto mucho más complejo, la adenina, se sintetizaba en una concentración apreciable.

La adenina es una de las cuatro bases nitrogenadas de las que se componen los ácidos nucleicos y por tanto está presente en el ADN y en ARN. Es también un compuesto fundamental del trifosfato de adenosina (ATP)

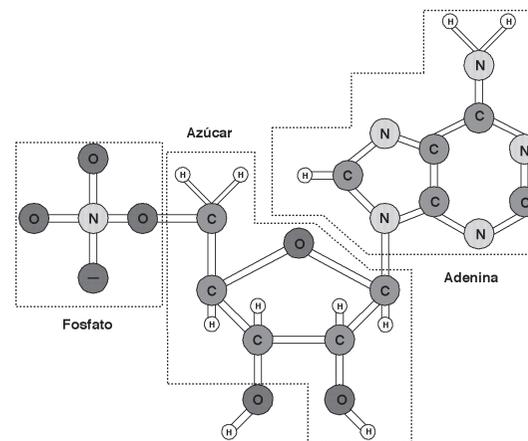


Figura 5: Esquema de un nucleótido, compuesto de un grupo fosfato, un azúcar (desoxirribosa) y una base nitrogenada (en este caso, la adenina). Los nucleótidos constituyen los componentes del ARN y del ADN.

implicado en el almacenamiento y utilización de la energía química en los sistemas biológicos. La adenina es una molécula bastante complicada y resulta asombroso que se forme, de manera eficaz, a partir de cianuro de hidrógeno en una reacción simple. Es muy posible que la posición central de esta molécula en biología sea debido a que es uno de los pocos componentes orgánicos con este grado de complejidad que se pudo formar sobre la Tierra primitiva.

Actualmente se ha logrado la síntesis de todos los monómeros del aparato genético bajo condiciones prebióticas. O sea, todos los componentes básicos (azúcares y bases nitrogenadas) pueden ser producidos químicamente en laboratorios sin intervención de los procesos que los producen en los seres vivos. Por ejemplo, otras dos bases nitrogenadas (la citosina y el uracilo) que componen los nucleótidos que forman el ARN se sintetizan a partir de un compuesto intermedio parecido al cianuro de hidrógeno, el cianoacetileno (HC_3N). Este compuesto se produce también abundantemente cuando se somete una mezcla de metano e hidrógeno a una descarga eléctrica. Igualmente, los azúcares que forman parte de los nucleótidos del material genético pueden sintetizarse en condiciones más o menos prebióticas a partir de formaldehído.

La atmósfera primitiva neutra. El problema

Resumiendo, en las secciones anteriores hemos visto como siempre que una mezcla reductora de gases es tratada con suficiente violencia se sintetizan una muestra de pequeñas moléculas altamente reactivas tales como cianuro de hidrógeno, formaldehído y cianoacetileno. En presencia de agua y amoníaco, éstas moléculas reaccionan entre sí para formar moléculas orgánicas más complicadas. Los productos que se obtienen son significativos ya que contienen más compuestos importantes (aminoácidos y adenina) para la química de la vida de los que pudieran ser atribuidos al puro azar.

Sin embargo, a la vista del origen de la atmósfera terrestre, los geólogos tienen fundadas dudas acerca de que la atmósfera primitiva fuera reductora. Se inclinan por una atmósfera neutra que contenía nitrógeno, dióxido de carbono y agua, con pequeñas cantidades de otras sustancias como metano, dióxido de azufre, cloruro de hidrógeno y amoníaco. Este tipo de atmósfera presenta serias dificultades para la síntesis de moléculas simples reactivas por medio de descargas eléctricas. Miller y Urey han intentado sintetizar aminoácidos a partir de una mezcla neutra de gases y encuentran que si el dióxido de carbono es más abundante que el hidrógeno entonces no se obtienen aminoácidos en concentraciones apreciables, salvo unas trazas de glicina. Por tanto, si la atmósfera primitiva era neutra la síntesis de aminoácidos y otras moléculas biológicas no pudo producirse en la Tierra a partir de la energía liberada por los relámpagos.

La química interestelar. La solución

Como hemos mencionado, los impactos de grandes meteoritos y cometas que sufrió la Tierra actuaron como agentes inhibidores de la vida. Sin embargo, los impactos de menor tamaño (minúsculos granos de polvo, meteoritos y cometas), ricos en materiales volátiles, podrían haber estado suministrando a la superficie de la Tierra elementos biogénicos. Los grandes impactos, asimismo, generaron fuertes ondas de choques cuya energía pudo ser utilizada en la síntesis de moléculas de interés biológico.

Los granos de polvo

La química prebiótica parece sustentarse en un pequeño número de moléculas precursoras que se generaban en la atmósfera reductora. Las más importantes son: el ácido cianhídrico, el amoníaco, el formaldehído, el agua y el cianoacetileno. Las observaciones radioastronómicas han muestra-

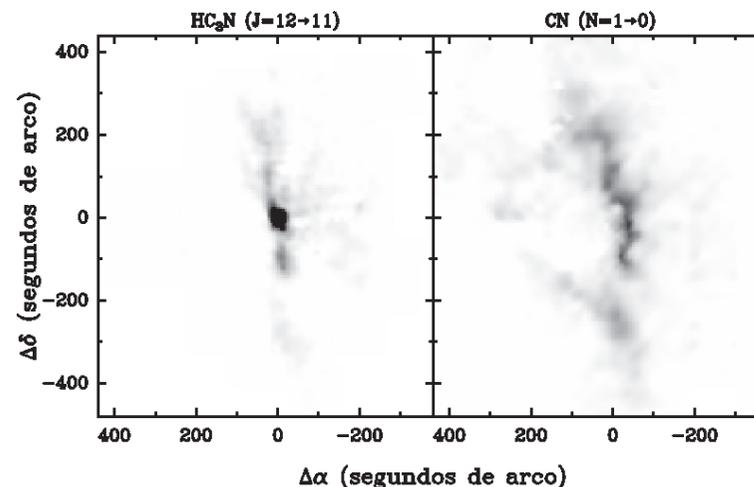


Figura 6: Distribución espacial de las moléculas de CN y HC₃N en la nube molecular asociada a la nebulosa de Orión observadas con el radiotelescopio de 30-m del IRAM. La molécula de HC₃N juega un papel fundamental en la formación de la adenina en el experimento de Juan Oró.

do que existe una química muy rica en las nubes moleculares del medio interestelar, como lo demuestra el hecho de que se hayan identificado ya más de 110 moléculas algunas de ellas con más de diez átomos. Una simple inspección de la relación de las moléculas observadas en el espacio interestelar (ver la página 277 del ANUARIO) muestra que todas las moléculas fundamentales en la síntesis han sido detectadas en las nubes moleculares de nuestra galaxia. Incluso moléculas como el ácido fórmico, el segundo compuesto más abundante en el experimento de Miller-Urey, se observa en grandes cantidades en regiones de formación estelar.

Aunque aún no se han detectado aminoácidos en el medio interestelar, las moléculas relacionadas más directamente con la síntesis prebiótica existen en el medio interestelar y pueden reaccionar con agua líquida para formarlos. Las bajas temperaturas en las nubes moleculares hacen que la mayoría de las moléculas volátiles se condensan en la superficie de los granos de polvo creando, a su alrededor, mantos helados ricos en agua, metano, amoníaco, etc. La evolución de las moléculas volátiles en los mantos de los granos de polvo está influenciada por el nacimiento de nuevas estrellas. La violenta eyección de materia a gran velocidad que sufren las estrellas antes de llegar a la fase de la secuencia principal, así como la

radiación ultravioleta que éstas emiten, procesan los mantos de los granos de polvo dando lugar a nuevos mantos, con residuos orgánicos.

La nube molecular en la que se formó el sistema solar contenía granos de polvo con mantos ricos en materia orgánica. Se piensa que estos granos pasaron a formar parte de los cometas y de los asteroides. En la actualidad, en la Tierra llueven anualmente unas 300 toneladas de material orgánico en forma de pequeños granos de polvo. Este polvo proviene de la evaporación de cometas y de la rotura de asteroides y por tanto tiene una composición química similar a los mantos de los granos del polvo en el medio interestelar. Se estima que en la Tierra primitiva la lluvia de polvo podría haber aportado unas 10000 toneladas por año de material orgánico a la sopa prebiótica. De hecho, en una atmósfera prebiótica neutra, este aporte supera a la generación de material orgánico a través de reacciones producidas por relampagueo.

Los meteoritos

Los meteoritos pueden también haber sido una fuente importante de material orgánico en la Tierra primitiva. Cabría pensar que el material orgánico contenido en estos objetos tendría que destruirse por el calor generado en su caída a la Tierra. Sin embargo, los análisis efectuados del meteorito que cayó cerca de Murchison, en Australia, han mostrado claramente que estos objetos pueden transportar gran cantidad de material orgánico y que pueden depositarlo intacto en la superficie de la Tierra. En este meteorito se ha detectado una gran variedad de material orgánico. Hasta ahora se han identificado más de 74 aminoácidos, la mayoría de tipo no-biológico y por tanto no son debidos a contaminación terrestre.

Hay que resaltar que cuando se compara la identidad y las abundancias relativas de los compuestos identificados en el meteorito Murchison con los obtenidos en el experimento de Miller-Urey se observa un paralelismo asombroso. Aunque el origen de los aminoácidos en los meteoritos no está claro, parece que la química que tiene lugar en el medio interestelar debe ser similar a la del experimento de Miller-Urey. En efecto, los precursores de los aminoácidos se encuentran en las nubes moleculares y los análisis de meteoritos carbonáceos muestran huellas de la presencia de agua líquida en su superficie. En estas condiciones es posible que la formación de aminoácidos en la superficie de los meteoritos pueda ocurrir en el medio interestelar.

Existen evidencias observacionales que apoyan la idea de que la aportación de material orgánico a la Tierra desde el exterior puede haber sido muy importante. Se ha descubierto recientemente la presencia de grandes



Figura 7: Meteorito Orgueil. Contiene material orgánico, como aminoácidos, que ha sobrevivido intacto en su caída a la Tierra.

cantidades de aminoácidos que aparecieron entre el fin del Cretácico y el principio del Terciario. Al tiempo que ocurría la extinción de los dinosaurios, hace unos 65 millones de años, se depositaron grandes cantidades de aminoácidos. Estos aminoácidos son de origen extraterrestre ya que no son biológicos y, además, son del mismo tipo que los que se encuentran frecuentemente en los meteoritos. La presencia de estos aminoácidos sólo puede explicarse por una lluvia relativamente copiosa de polvo interplanetario o por el impacto de un gran meteorito en el que el calor producido no incineró los aminoácidos. La hipótesis más plausible es que la lluvia de polvo estuvo provocada por los restos provenientes de un gran cometa atrapado en el sistema solar de manera que un fragmento del mismo finalmente chocó con la Tierra, provocando la extinción de los dinosaurios.

En ambos tipos de atmósfera (reductora y neutra), la Tierra prebiótica contenía una gran cantidad de sustancias orgánicas de cierta complejidad que constituyen el primer paso para la construcción de los elementos esenciales de la vida. En la próxima sección analizaremos cómo se produjo este paso.

Desde los aminoácidos y ácidos nucleicos a la célula

Hace unos 3800 millones de años, los lagos y mares de la Tierra constituían una sopa prebiótica con moléculas altamente reactivas progenitoras

de compuestos importantes para la biología. El siguiente paso fue probablemente la formación de los polímeros. Esto es especialmente importante en el caso de la información genética ya que ésta no puede transmitirse a través de pequeñas moléculas. Para formar polímeros la sopa hubo de espesarse o solidificarse de manera que pudieran sintetizarse grandes moléculas. Incluso suponiendo que hemos sido capaces de sintetizar macromoléculas a través de varios experimentos de laboratorio, aún estamos muy lejos de ser capaces de realizar la síntesis de una proteína simple, y mucho menos de los ácidos nucleicos, a partir de las condiciones prebióticas.

Ahora debemos enfrentarnos al gran dilema sobre el origen de la vida. Consiste en establecer qué debe eliminarse (membrana, metabolismo, proteínas, enzimas, material genético, ...) de la célula más simple para que ésta pueda seguir viviendo en las condiciones prebióticas.

Las diferentes teorías sobre el origen de la vida difieren en el orden en el que el organismo se va dotando de todos los elementos esenciales. Uno de los aspectos fundamentales de la vida actual es que las proteínas y los ácidos nucleicos (material genético) son inseparables. El ADN contiene el proyecto original del organismo y se duplica durante la reproducción debido a su estructura de doble hélice. Sin embargo, el ADN no puede duplicarse por sí sólo, necesita de las proteínas a lo largo del proceso de replicación, ya que ni el ADN ni el ARN tienen capacidad catalítica. Por otro lado, las proteínas sí tienen capacidad catalítica pero son incapaces de generar nuevas proteínas sin el ADN. Así que la pregunta central es: ¿quién tuvo primacía en el origen de la vida, las proteínas o los ácidos nucleicos?.

A continuación vamos a describir someramente los modelos más relevantes que se han propuesto a la hora de explicar el origen de un organismo vivo. En general hay dos grandes tendencias según se considere que la vida se originó con las proteínas o con los ácidos nucleicos. También están aquellos que proponen un doble origen para la vida.

El mundo proteínico

La primera teoría sobre el origen de la vida en la Tierra fue lanzada por A. I. Oparin (1924) y J. B. S. Haldane (1929). Según esta teoría, la vida emergió de la sopa caliente y diluida en la que la síntesis mediante reacciones corrientes la proveía de compuestos orgánicos. Los organismos iniciales se habrían desarrollado empleándolos para alimentarse durante un cierto tiempo. Oparin defiende que lo primero que se formaron fueron las células. Las células eran estructuras estables que se forman en líquidos grasos cuando se mezclan con agua. Estas estructuras (coacervados) se suspenden en el agua y pueden considerarse como membrana celular.

Dentro de ella se produjeron procesos químicos inorgánicos y la vida pudo comenzar por acumulación de poblaciones de moléculas cada vez más complejas. Las proteínas aparecieron entonces por organización de las moléculas dentro de los coacervados en un sistema de automantenimiento del ciclo metabólico. Finalmente aparecieron los genes.

Oparin se convirtió en un defensor del origen de la vida despreciando el papel de la genética. Descartó la idea de que el material genético (que se describirá en la próxima sección) jugara un papel fundamental y que la vida pudiera ser inherente a una molécula individual, proteína o ácido nucleico, y que el resto del protoplasma hiciera de simple medio inerte. Oparin llegó a comparar la idea de gen desnudo con la del filósofo griego Empédocles que creía que los seres vivos aparecieron por desarrollos independientes de los órganos.

La primacía de los ácidos nucleicos. El gen desnudo

Los avances en la comprensión del papel que desempeñan los ácidos nucleicos en la célula como portadores de la herencia, y por tanto en la autorreplicación, ha conducido a nuevas hipótesis sobre el origen de la vida. En estos nuevos modelos la primacía la tienen los ácidos nucleicos.

La primera teoría en este sentido fue propuesta a mediados de los 60 por Hermann J. Muller. Según esta hipótesis, la vida surgió cuando se formó la primera molécula autorreplicante considerada como el antecesor más remoto del ADN, la molécula fundamental de la vida. Este modelo, conocido como el gen desnudo, sugiere que una molécula de proto-ADN asociada a una proteína surgió en un medio de materia orgánica diluida. Con el tiempo, al gen desnudo le resultó de mayor valor adaptativo el controlar el medio ambiente y dejó de estar desnudo, recubriéndose de proteínas y de una membrana. Según esta teoría, el origen de la vida coincidiría con la aparición de la primera entidad capaz de reproducirse y sufrir mutaciones. Sin lugar a dudas, los virus son una fuente de inspiración en este tipo de teorías, ya que están formados por cadenas cortas de ácidos nucleicos envueltos por una proteína.

El mundo del ARN

El mayor problema de estas teorías es que el ADN es una entidad demasiado compleja y se sintetiza con mucha dificultad. La aparición en escena del ARN, un ácido mucho más simple que el ADN y que puede contener información genética, ha dado nuevos bríos a la primacía de los ácidos nucleicos. A finales de los años 70 Carl R. Woese, Francis Crick

y Leslie E. Orgel propusieron que el ARN fue el primero en aparecer e instaurar el mundo del ARN. En este modelo es el ARN el que cataliza todas las reacciones necesarias para que la vida se origine y se reproduzca.

En los últimos diez años ha habido una serie de pruebas que apoyan la existencia de un mundo de ARN. El primer descubrimiento importante fue realizado en 1983 por Thomas R. Cech y Sidney Altman quienes descubrieron que existen enzimas (ribozimas) que no son proteínicas sino que están hechas de ARN. Otros dos descubrimientos recientes muestran la versatilidad del ARN que tan importante pudo ser en los primeros pasos de la vida. Leslie Orgel ha fabricado unos nucleótidos ricos en energía que mezclados con ciertas moléculas de ARN se unen para formar una nueva cadena ARN que a su vez se une con la existente. El ARN inicial de una sola hebra se convierte en una doble hélice. Todo este proceso se realiza sin la presencia de las enzimas proteínicas. Aunque los resultados son modestos (la longitud media no pasa de 15 unidades), el experimento indica que el gen desnudo podría haberse reproducido en la Tierra sin necesidad de las proteínas.

El segundo experimento de gran importancia fue realizado por Manfred Eigen. En un tubo de ensayo Eigen puso la enzima ARN-polimerasa extraída del virus Q β junto con nucleótidos activos y sales. Al cabo de un tiempo apareció el ARN que luego se reprodujo y evolucionó. El ARN que aparecía inicialmente tenía diferentes mezclas de unos 60 nucleótidos y al final sólo había un tipo de ARN con 150-250 nucleótidos. El ARN vencedor variaba de experimento a experimento. Así, bajo ciertas condiciones de abundancia de nucleótidos, la enzima ARN-polimerasa es capaz de generar ARN que se replica y lucha por sobrevivir. Este experimento muestra que en presencia de proteínas (enzimas) se genera ARN que se replica sin necesidad de material genético.

Eigen y colaboradores han propuesto una teoría para el origen de la vida basado en los resultados de los sistemas Q β . Su hipótesis no arranca de la típica sopa prebiótica diluida, sino de un caldo bioquímico propio, mucho más rico que los obtenidos en el mejor experimento Miller-Urey. El caldo incluye pequeñas proteínas, grasas sintetizadas al azar en cantidad suficiente para generar fragmentos de membrana, y nucleótidos activos y subunidades ricas en energía capaces de construir ácidos nucleicos. El acontecimiento crítico es el montaje, por azar, de una molécula capaz de reproducirse, el ARN. El principal problema en este modelo lo constituyen sus condiciones iniciales, mucho más exigentes que en otros modelos y el hecho de que la cadena de ARN más larga que se ha sintetizado sólo puede tener unos 100-200 nucleótidos sin que se destruya su identidad por errores en la replicación.

Sin lugar a dudas, estos resultados espectaculares ponen de manifiesto la gran versatilidad del ARN e indican que este ácido nucleico pudo jugar un papel fundamental en los procesos que condujeron a la aparición de la vida en la Tierra.

El doble origen de la vida:

Primero el metabolismo después la reproducción

Siguiendo la idea de que el parasitismo y la simbiosis son las fuerzas de la evolución en la complejidad de las células, se ha propuesto que la vida se generó “dos” veces. En primer lugar se generaron células con sólo el aparato metabólico dirigido por enzimas pero sin aparato replicatorio. Las células no tendrían capacidad de reproducción exacta pero crecerían y se dividirían. Viviendo durante muchos años se diversificaron y refinaron su metabolismo y sintetizaron la molécula suministradora de energía en bioquímica, el trifosfato de adenosina (ATP). También sintetizaron otras moléculas con estructura similar, como es el monofosfato de adenosina, uno de los nucleótidos que forman parte del ARN. En esta célula, dotada de un gran número de nucleótidos, sucedió algo similar a lo ocurrido en el experimento de Eigen. Así apareció el ARN, que al principio fue un parásito probablemente bastante nocivo. Al cabo del tiempo, algunas células aprendieron a vivir con el ARN, produciéndose la simbiosis entre ambos. Un factor a favor de la teoría del ARN parásito proviene de la química de los aminoácidos y de los nucleótidos. Hemos visto que en los ambientes prebióticos es mucho más fácil que se formaran aminoácidos que ácidos nucleicos.

Las arcillas como material genético

La gran dificultad que entraña la síntesis de nucleótidos y la replicación del ARN bajo condiciones prebióticas razonables hacen que se propongan otros sistemas a priori más “sencillos”.

Hace 30 años, Graham Cairns-Smith lanzó la sorprendente e innovadora idea de que el primer sistema genético era inorgánico y se basaba en las irregularidades de las estructuras de los cristales de unas arcillas. Estos cristales actuarían primero como catalizadores para sintetizar las enzimas. Después las arcillas y las enzimas aprenderían a generar la membrana celular y las células contendrían cristales de arcilla como sistema genético. Alguna célula descubrió que el ARN era mejor que los cristales de arcilla y ésta se adaptó mejor que las células con sistema genético arcilloso,

apareciendo la célula actual. Hasta el momento no se ha realizado ningún experimento de laboratorio con el fin de probar esta idea.

Perspectivas futuras

A pesar de los grandes progresos realizados en todas las disciplinas involucradas en el origen de la vida, existen todavía muchas incógnitas que debemos resolver. Sin lugar a dudas, los biólogos, a través de experimentos de laboratorio, lograrán desvelar cómo podrían funcionar organismos vivos aún más simples que una bacteria.

El comprender el origen y la composición de la atmósfera primigenia es fundamental para determinar las condiciones en las que tuvo lugar la química prebiótica. La astronomía seguirá aportando nuevos datos sobre la química interestelar con la detección de nuevas moléculas y quizá nos sorprenda con la identificación en el espacio del primer aminoácido. Los grandes radio telescopios milimétricos van a suponer una revolución en este campo. En particular, los interferómetros permitirán, por primera vez, el estudio de la química de la materia que rodea a las estrellas de tipo solar recién formadas. Asimismo, el satélite infrarrojo ISO, lanzado por la Agencia Espacial Europea en 1995, contribuirá a mejorar nuestro conocimiento de la composición química de los granos de polvo en el medio interestelar y, con ello, determinar la importancia del aporte externo de material orgánico a la Tierra prebiótica.

Referencias

- [1] “Origen de la vida sobre la Tierra”, *Aleksandr I. Oparin*, ed. Tecnos
- [2] “Los orígenes de la vida”, *Leslie E. Orgel*, Alianza ed.
- [3] “Infinito en todas direcciones”, *Freeman Dyson*
- [4] “Orígenes”, *R. Shapiro*, ed. Salvat
- [5] “Vida en el Universo”, monográfico de *Investigación y Ciencia*, diciembre 1994
- [6] “La vida en otros mundos”, *Manuel Alfonseca*, ed. McGraw-Hill