

ELEMENTOS QUÍMICOS, MOLÉCULAS Y VIDA

ERNESTO CARMONA GUZMÁN *

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Departamento de Química Inorgánica e Instituto de Investigaciones Químicas. Universidad de Sevilla y Consejo Superior de investigaciones Científicas.

RESUMEN

Aunque la materia ordinaria que constituye todo cuanto nos rodea está formada por los átomos de los alrededor de noventa elementos químicos naturales, la vida que conocemos utiliza apenas una tercera parte de estos elementos. Con excepción del hidrógeno, producido junto con el helio en la *Gran Explosión* que dio origen al Universo, estos elementos se formaron durante la *nucleosíntesis estelar*, en las reacciones nucleares que ocurrieron y siguen aconteciendo, en las estrellas.

La vida surgió en la Tierra hace algo más de 3500 millones de años, a partir de las complejas moléculas biológicas que se formaron en la *síntesis primordial*. Con los conocimientos actuales puede explicarse de manera no demasiado compleja la síntesis de aminoácidos, hidratos de carbono y otras moléculas esenciales para la vida, a partir de moléculas inorgánicas y orgánicas sencillas, aunque las etapas siguientes en orden de complejidad bioquímica, aquellas que permitieron la aparición de las células primitivas de las que emergió la vida, resultan todavía muy difíciles de explicar.

En este artículo se hará referencia a los elementos químicos, cuyos átomos son los constituyentes básicos de la materia, y a su origen. También se considerarán las moléculas que estos elementos forman, que son conjuntos, grupos de átomos, firmemente unidos entre

sí, que encontramos por doquier: en el aire que respiramos, el agua que bebemos, en nuestro propio organismo,... Y de entre ellas se hará referencia a las moléculas presentes en la atmósfera primitiva de nuestro planeta, la Tierra, cuando se formó hace más de 4500 millones de años, es decir, la atmósfera prebiótica, y a otras moléculas que surgieron de forma gradual (aminoácidos, hidratos de carbono, proteínas, etc.) y dieron finalmente origen a la vida.

Tal vez en alguna ocasión el lector se haya preguntado de qué están hechas las cosas, la materia que nos rodea, la naturaleza de la que somos parte, nosotros mismos, o el universo que conocemos. O le haya surgido esta cuestión al contemplar cualquier imagen de la naturaleza, una en la que podamos, por ejemplo, ver agua, arena, rocas, vegetación, personas,...; o el propio aire, que escaparía a nuestra observación, pero que forma la atmósfera de la Tierra, mezcla de oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, vapor de agua, y otras sustancias; o los minerales y las rocas, que contienen carbono, oxígeno, nitrógeno, silicio, fósforo, etc, combinados con otros elementos de carácter metálico: hierro, magnesio, cobre, calcio, níquel, y muchos más.

La respuesta a la cuestión anterior es simple: toda la materia está constituida por los alrededor de noventa elementos naturales que los químicos ordenamos para su comprensión y estudio en una distribución que se conoce como la Tabla Periódica de los elementos químicos.

TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS

The periodic table is organized into groups (columns) and periods (rows). Elements are color-coded by their physical state at standard conditions: Gaseous (purple), Solids (green), Liquids (blue), and Synthetic (yellow). The legend at the bottom categorizes elements into groups: NO-METAL, METALES ALCALINOS, METALES ALCALINO-TÉRREOS, METALES DE TRANSICIÓN, SEMICONDUCTOR, GASES NOBLES, LANTÁNIDOS, and ACTÍNIDOS.

Figura 1. La Tabla Periódica de los elementos químicos.

This simplified periodic table highlights elements essential for life, including Hydrogen (H), Carbon (C), Nitrogen (N), Oxygen (O), Phosphorus (P), Sulfur (S), Chlorine (Cl), and various trace elements like Zinc (Zn), Copper (Cu), and Iron (Fe). The legend at the bottom categorizes elements into groups: NO-METAL, METALES ALCALINOS, METALES ALCALINO-TÉRREOS, METALES DE TRANSICIÓN, SEMICONDUCTOR, GASES NOBLES, LANTÁNIDOS, and ACTÍNIDOS.

Figura 2. Los elementos químicos esenciales para la vida.

micos (Figura 1). El primero y más sencillo es el hidrógeno y el último de los naturales el que ocupa el nonagésimo segundo lugar, es decir el uranio.

La vida es, sin embargo, más sencilla en lo que a la constitución química se refiere. De forma mayoritaria, cuatro elementos —hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno— se permutan de incontables formas en las moléculas de la vida, aunque necesitan para ello de la contribución indispensable de tres elementos no metálicos, fósforo, azufre, y cloro, y de cuatro metales, sodio, potasio, magnesio y calcio, elementos que ejercen distintas funciones vitales que requieren su presencia en nuestro organismo en cantidades desde algunas decenas hasta cientos de gramos. Además de estos once elementos hay otros seis, que se denominan elementos traza, que existen en proporciones de entre décimas hasta algunos gramos, y una decena más en concentraciones muy inferiores. En definitiva, alrededor de veintisiete elementos resultan suficientes para el sostenimiento de la vida (Figura 2).

Es también posible que el lector se haya preguntado cómo han surgido estos elementos, cuál es su origen. La respuesta a esta cuestión no es ya tan simple, y fue necesario esperar hasta mediados del pasado siglo para que cuatro ilustres físicos la desvelaran: el matrimonio Burbidge, Margaret y Geoffrey; William Fowler y Fred Hoyle, en un legendario artículo publicado en *Review of Modern Physics* (Figura 3) en 1957, que desde entonces forma parte de los anales de la Ciencia. Esta teoría de la *nucleosíntesis estelar* propone que todos los elementos químicos derivan del hidrógeno, o de lo que en este caso es equivalente, de los protones,

los núcleos de hidrógeno, generados en la *Gran Explosión*, el *Big Bang*, que se transmutan en los núcleos de los restantes elementos a través de las reacciones nucleares que ocurren en el interior de las estrellas.

Desde una perspectiva científica, la gran explosión cósmica, el *Big Bang*, representa el mejor modelo de que disponemos para explicar el origen del Universo. Postula que hace unos 13.700 millones de años, se produjo de forma espontánea la *Gran Explosión*, que generó la energía, el espacio y el tiempo. La temperatura inicial fue extraordinariamente elevada (10^{30} K) pero de inmediato, con la expansión, la materia comenzó a enfriarse, y cuando la temperatura descendió hasta unos 10^9 K las partículas subatómicas se unieron para formar los núcleos de los átomos más ligeros, en la denominada *nucleosíntesis del Big Bang*, que produjo fundamentalmente hidrógeno y helio en forma de diferentes isótopos. También se generaron trazas de litio, el elemento siguiente al hidrógeno y el helio en complejidad atómica, mientras que, como antes se indicó, con pocas excepciones todos los demás elementos se formaron como consecuencia de las reacciones nucleares que acontecieron, y siguen ocurriendo, en las estrellas, es decir mediante la *nucleosíntesis estelar*.

Así pues, toda la materia que conocemos, incluidos naturalmente nosotros mismos, el aire que respiramos o el agua que bebemos, y para no limitarnos a nuestro mundo, también las estrellas y galaxias más lejanas, está constituida por protones, neutrones y electrones, combinados en las formas que conocemos como átomos de los elementos químicos. Hasta hace solo unas décadas, esta materia, que los astrónomos denominan *bariónica*, se consideraba como el constituyente exclusivo, o casi exclusivo, del Universo. Sin embargo, en fechas recientes se ha puesto de manifiesto que la materia bariónica supone tan sólo el 4.6% del Universo; que existe un 23% de una misteriosa *materia oscura*, que ejerce atracción gravitatoria pero no absorbe ni emite luz; y nada menos que un 72% de una aún más extraña y desconocida forma de energía, llamada *energía oscura*, que tiene acción antigravitatoria, y que es responsable de la expansión acelerada del Universo, propuesta esta última de hecho muy reciente, que fue distinguida en el año 2011 con el Premio Nobel de Física (S. Perlmutter, B.P. Schmidt y A.G. Riess).

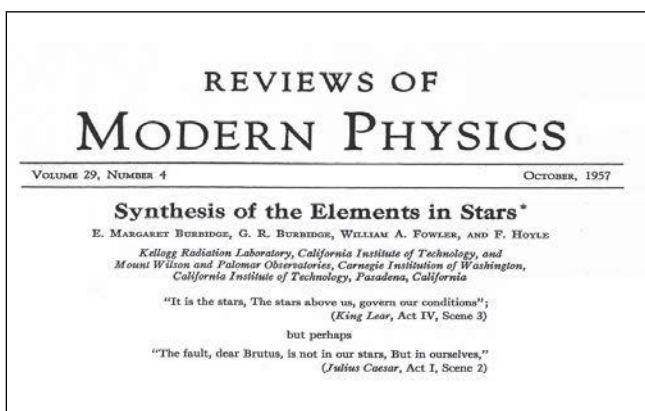


Figura 3. Propuesta de E.M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler y F. Hoyle de la nucleosíntesis estelar.

Las primeras estrellas se formaron unos 400 millones de años después del *Big Bang* y estaban constituidas exclusivamente por *gas primordial*, es decir, por hidrógeno y helio. Se denominan estrellas de *población III*, y debieron ser de porte impresionante, las mayores con masa de hasta $10^6 M_s$ (M_s = masa del sol). Por esta razón debieron terminar su vida muy pronto, en espectaculares supernovas que esparcieron por el universo el material sintetizado, una gran variedad de elementos químicos más pesados que el hidrógeno y el helio que los astrónomos llaman indiscriminadamente metales, sin diferenciar entre auténticos metales, como el Fe, y no metales como por ejemplo el C o el O. Este material, junto con el gas primordial formó las estrellas de siguiente generación, las llamadas estrellas de *población II*, que se caracterizan por una *metalicidad* todavía baja (la metalicidad se define como la proporción relativa de Fe a H que contiene una estrella, en comparación con la misma proporción en el Sol). Las siguientes generaciones de estrellas se formaron a partir de nubes de gas enriquecidas en elementos pesados producidos en estrellas de generaciones anteriores. Tienen metalicidad más elevada y abundan en el disco y los brazos de las galaxias en espiral. Nuestro Sol parece ser una estrella joven de *población I*, que es como se designa a esta siguiente generación de estrellas.

Aunque no es este el lugar para discutir con el detalle debido la nucleosíntesis de los elementos, por su importancia para la vida se hará una referencia breve a la nucleosíntesis de los elementos C, N y O, que como antes se indicó, junto con el hidrógeno producido en la *Gran Explosión*, constituyen los pilares de la vida.

Nuestro Sol, centro del Sistema Solar que acoge a nuestro planeta Tierra, se formó hace aproximadamente 4.500 millones de años, y tiene una masa extraordinaria, inimaginable para nosotros, 2×10^{30} kg, consistente sobre todo de H ($\sim 78.5\%$ en masa) y He ($\sim 19.75\%$). Aunque la temperatura de su superficie es relativamente baja (unos 5700 K), las regiones del interior tienen temperaturas muchas más elevadas, que llegan a ser de varios millones de Kelvin en el núcleo. A estas temperaturas tan altas se produce la fusión de los núcleos de hidrógeno, proceso denominado también *combustión del hidrógeno* (se requieren unos diez millones de Kelvin), que ocurre principalmente-

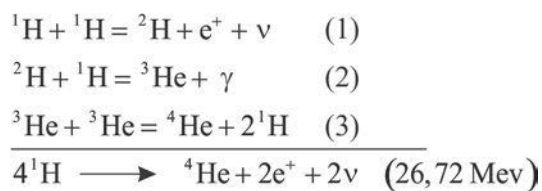


Figura 4. Combustión nuclear del hidrógeno. La cadena protón-protón I.

mediante la secuencia de reacciones que recoge la Figura 4. La diferencia de masa entre la izquierda y la derecha de la ecuación se convierte en energía de acuerdo con la ecuación de Einstein, $E=mc^2$, de tal forma que una pequeña cantidad de materia origina una enorme cantidad de energía. Se estima que cada segundo se consumen en el Sol alrededor de 600 millones de toneladas de hidrógeno, que se convierten en 595.5 millones de toneladas de helio, y los 4.5 millones de toneladas restantes se transforman en energía. Esta energía se libera en el núcleo del Sol, en forma de radiación γ de altísima energía, que se amortigua en parte en su camino hacia la superficie del Sol, itinerario que tarda en recorrer alrededor de un millón de años. Por otro lado, cuando los positrones se encuentran con sus antipartículas, los electrones, se aniquilan mutuamente y se convierten en fotones, es decir, en luz. Los neutrinos, partículas sin carga, y al parecer sin masa, o casi, se escapan del Sol, y son capaces de atravesar el universo entero, a nosotros mismos de forma incesante, sin que podamos detectarlos en condiciones ordinarias, a pesar de que son cantidades inimaginables de ellos los que lo hacen. En suma, en esta transformación cuatro protones se convierten en un núcleo de ${}^4\text{He}$ más dos positrones y dos neutrinos. El proceso se denomina *reacción, o cadena protón-protón I (PPI)*.

Los estudios espectroscópicos del Sol revelan la existencia de muchos elementos pesados, formados probablemente, en estrellas de anterior generación. En presencia de algunos de estos elementos, sobre todo de carbono, se establece una reacción catalítica que proporciona un camino alternativo para la *combustión del hidrógeno*. Se denomina ciclo de carbono, nitrógeno y oxígeno, o *ciclo CNO*, y necesita temperaturas más altas (cercanas a 25 millones de K) para vencer las mayores repulsiones electrostáticas de las reacciones

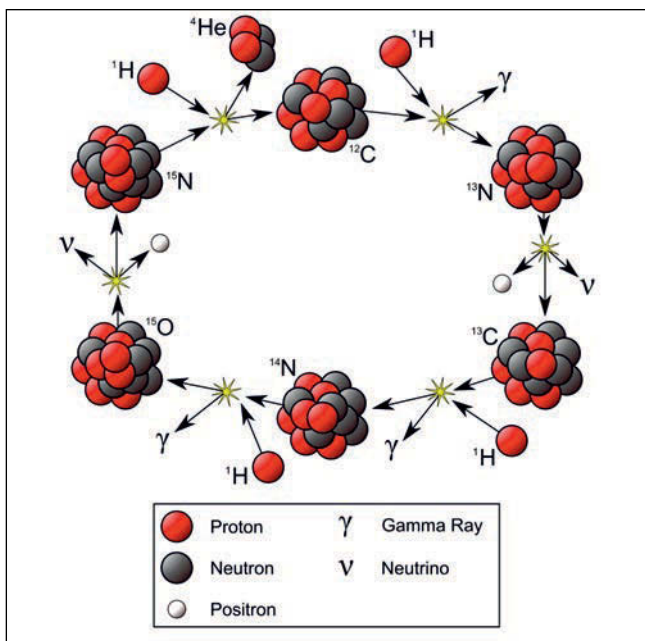


Figura 5. Síntesis nuclear del nitrógeno propuesta por Bethe y von Weizsäcker en 1938.

de fusión nuclear que lo constituyen, por lo que se estima que en el Sol más del 90% de la energía procede de las cadenas PP y solo una muy pequeña parte procede de este ciclo.

La Figura 5 muestra la parte principal de este complejo ciclo, propuesto por Bethe y von Weizsäcker en 1938. Se inicia, por ejemplo, cuando el ^{12}C presente en la estrella absorbe un protón y emite energía en forma de radiación γ . Este proceso se repite dos veces más en el ciclo, tras otras tantas etapas de decaimiento beta positivo, y el ciclo termina con una reacción de absorción de otro protón y emisión de un núcleo de ^4He , por lo que en definitiva, se consumen cuatro núcleos de ^1H , y se genera uno de ^4He . Pero la importancia del ciclo estriba sobre todo en que constituye la fuente principal de los núcleos de ^{13}C , ^{14}N , ^{15}N y ^{17}O en el universo, y es, en definitiva, el origen de los isótopos estables del elemento nitrógeno.

Cuando una estrella se encuentra en el estadio de su evolución que se denomina *gigante roja*, la mayor parte de su combustible, el hidrógeno, se ha consumido, y se ha originado un núcleo central de helio. Al romperse el equilibrio entre la energía de la fusión termonuclear, la irradiada hacia el exterior, y la gravitatoria, el núcleo se colapsa por el predominio de esta

última y se produce un espectacular aumento de la temperatura que provoca la combustión del hidrógeno de las capas próximas al núcleo. Como consecuencia, la estrella se expande y su volumen aumenta extraordinariamente, convirtiéndose en una *gigante roja*. La compresión del núcleo hace aumentar aún más su temperatura, y cuando se alcanzan alrededor de cien millones de Kelvin se produce el *flash de helio*, es decir, la combustión del He para producir primero carbono y después oxígeno. La primera etapa del proceso consiste en la fusión de dos núcleos de helio para formar uno de berilio, pero éste es inestable respecto a la emisión de una partícula α y tiene una vida media de tan sólo 10^{-16} s. Las drásticas condiciones que existen en las estrellas crean, sin embargo, una pequeña concentración de equilibrio de ^8Be , que puede capturar otra partícula α originando un estado excitado radiactivo del ^{12}C de energía mayor que el estado fundamental. La reacción global se conoce como la *reacción triple alfa*, y es responsable de la existencia del elemento carbono en el Universo, y *por tanto responsable en última instancia de la vida*.

Al aumentar la cantidad de ^{12}C presente en una estrella se puede producir, si la estrella tiene masa suficientemente grande, la captura de una cuarta partícula α para formar oxígeno-16. A partir de éste se generan en etapas sucesivas ^{20}Ne y ^{24}Mg (Figura 6), y mediante otras reacciones, ^{28}Si , ^{32}S y otros elementos hasta el ^{56}Fe , el más estable de todos los núcleos por poseer la máxima energía de unión o de ligadura. Pero en lo que a esta discusión se refiere, el resultado final de la combustión del helio es la producción de cantidades comparables de ^{12}C y ^{16}O , los *nucleidos más abundantes en el Universo, tras los de ^1H y ^4He* . Así pues, y a modo de recapitulación, de los cuatro elementos esenciales para la vida que se han considerado, hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, el primero, el hidrógeno, se generó en la nucleosíntesis de la *Gran Explosión*, y los demás durante la nucleosíntesis estelar: el nitrógeno en el *ciclo CNO*, y los otros dos, carbono y oxígeno, en la combustión del helio en las estrellas gigantes rojas, mediante las reacciones *triple alfa* y de captura adicional de una partícula alfa por el ^{12}C , respectivamente.

Si la estrella tiene una masa suficientemente grande, (al menos $4 M_{\odot}$), la temperatura en su interior puede alcanzar valores muchos más elevados y per-

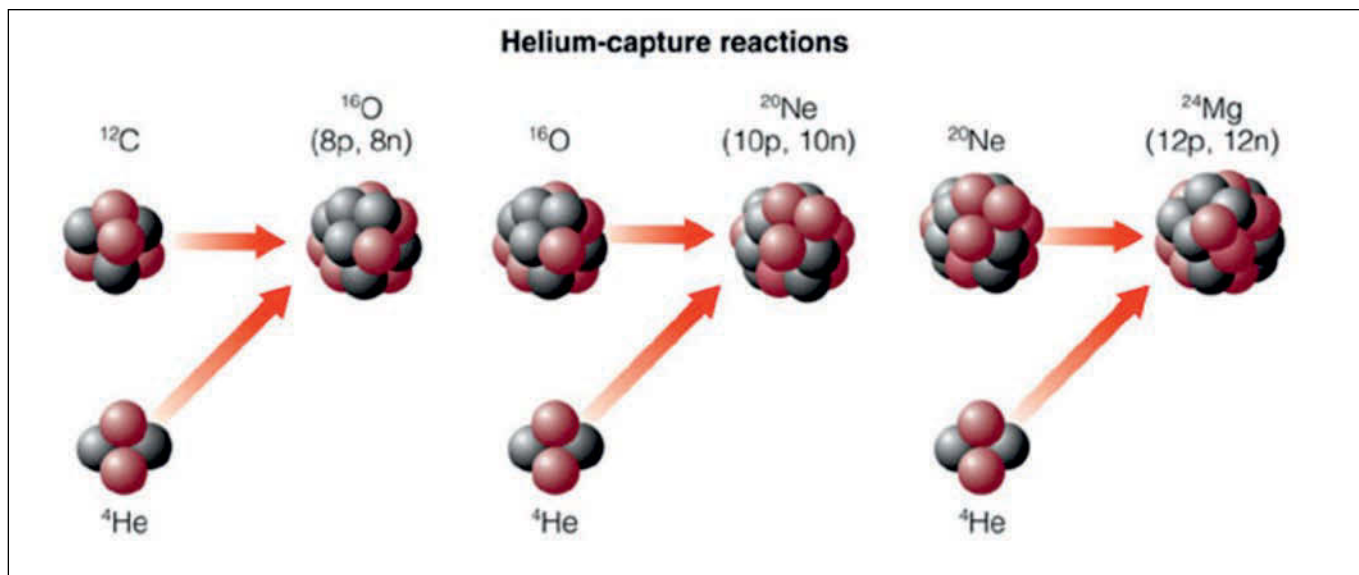


Figura 6. Algunas reacciones nucleares de captura de partículas α

mitir otras fusiones nucleares que, tras la captura de partículas α , producen sucesivamente como ya se ha apuntado, Ne-20, Mg-24, Si-28, etc., hasta el Fe-56, el nucleido más estable de todos, y por tanto el último que puede formarse mediante reacciones de fusión nuclear (la formación de los más pesados sería endotérmica). Los elementos más pesados que el Fe se producen mediante reacciones de captura de neutrones (procesos *r* y *s* de *rapid* y *slow*, respectivamente) y de captura electrones o de protones, que tienen lugar en las fases de gigante de las diferentes estrellas, y muy especialmente en las supernovas. Las supernovas, y sobre todo las conocidas como de tipo II, se encuentran entre los fenómenos más violentos del Universo y suponen la muerte apocalíptica de las estrellas mucho más masivas que el Sol (10, 20, 100... veces más). La explosión arroja al espacio interestelar billones, trillones de toneladas de elementos químicos, incluyendo a los más pesados, que se extienden hasta distancias de miles de millones de km. La explosión suele tener una luminosidad comparable a la de una galaxia entera, es decir, miles de millones de soles. En la Vía Láctea se producen cada siglo dos o tres supernovas, y se cree de hecho que una de ellas tuvo una importante contribución en la formación del Sistema Solar.

Hace unos 4.700 millones de años, se acumuló en la Vía Láctea una enorme nube de gas de una extraordinaria extensión, que rotaba con lentitud, y que

comenzó a contraerse bajo su propio campo de atracción gravitatoria. La nébula estaba compuesta fundamentalmente por gas primordial, es decir por hidrógeno y helio generados en el origen del Universo, pero contenía además cantidades muy grandes (aunque comparativamente inferiores) de otros elementos producidos en grandes estrellas de existencia anterior, expulsados al espacio exterior en las supernovas (metales y no metales y múltiples combinaciones: óxidos, hidrocarburos, agua, amoníaco, etc.).

Estas inmensas nubes interestelares pueden tener una masa de $10^6 M_{\odot}$ y una extensión de 100-200 años luz. Inicialmente su temperatura es de tan solo unos 30 Kelvin, aunque su núcleo, más caliente, puede estar a unos 100-200 Kelvin. La nube que originó el Sistema Solar debió ser mucho más pequeña, y, como se ha indicado giraba lentamente al tiempo que se contraía por acción de la gravedad. Para conservar el momento angular, la velocidad de giro fue aumentando con la contracción. Inicialmente la energía desprendida en la contracción se irradió al exterior, pero la nube se fue haciendo cada vez menos transparente, por lo que la contracción llegó a ser adiabática y la temperatura aumentó más y más. Se ha propuesto que la onda de choque de una supernova no demasiado lejana contribuyó al proceso anterior, y tal vez fragmentó la nébula original. El colapso se produjo más rápidamente en la región central que en las externas, de forma que sobre esta zona fue cayendo el material

externo, cada vez con mayor rapidez, originando una protoestrella, con un radio comparable al de la órbita de Júpiter. La temperatura alcanzó algunos miles de Kelvin provocando la disociación del H_2 a H atómico, que aceleró la caída libre de material de las capas externas.

El aumento gradual de la temperatura a lo largo de cientos de miles, tal vez millones, de años hizo que comenzara la combustión del hidrógeno y que la protoestrella se iluminara. Antes de que se alcanzara el equilibrio energético comparable al actual, y durante un larguísimo período de tiempo, la protoestrella pasó por la fase denominada *T Tauri*: gran parte del material de la nube que se concentraba en el núcleo se expulsaba al exterior a lo largo de los polos de la estrella, en forma de espectaculares chorros que pueden alcanzar enormes distancias, antes de volver a caer por acción de la gravedad. Estos chorros de gas caliente expulsaban millones de toneladas de materia cada año y originaron una especie de bulbo esférico central, la protoestrella, y un disco de acreción, que es lo que se conoce como *T Tauri*.

Las temperaturas extraordinariamente elevadas, cientos de miles de K (de hecho algunos millones en el núcleo), causaron el fraccionamiento del gas, el polvo y el material sólido original, de tal forma que los materiales menos volátiles, los constituidos por los “metales”, se condensaron relativamente cerca del Sol, para formar más adelante los planetas terrestres, es decir, los planetas rocosos, constituidos por Fe, Ni, silicatos, aluminosilicatos, óxidos, etc. Por su parte, el H_2 y el He, y también moléculas ligeras como H_2O , NH_3 , CH_4 , óxidos del carbono, etc., fueron desplazados por el viento solar a regiones más remotas donde formaron los planetas gaseosos gigantes (Júpiter y Saturno) y los gigantes helados (Urano y Neptuno). La formación de los planetas ocurrió de forma gradual: las partículas de polvo muy calientes colisionaron casualmente o por acción de la gravedad, y fueron aumentando de tamaño, originando inicialmente cuerpos celestes con algunos kilómetros de diámetro que al agregarse aún más, alcanzaron diámetros de cientos de kilómetros, dieron origen a los *planetesimales*, y finalmente a los planetas ya mencionados.

Este proceso requirió al parecer algunos millones de años y fueron además necesarios muchas decenas

de millones de años más para que el Sistema Solar adquiriera la situación de equilibrio relativo que conocemos. Pero posteriormente, y durante varios cientos de millones de años, hasta hace aproximadamente 3900 millones de años, se reorganizaron las órbitas de los planetas gigantes, que se alejaron del Sol. Esto llevó consigo, entre otros acontecimientos, un intenso bombardeo por planetesimales de gran tamaño de los planetas más cercanos al Sol y entre ellos la Tierra.

Numerosas observaciones e infinidad de cálculos y análisis de modelos, han puesto de manifiesto que no mucho después de su formación, nuestro planeta sufrió la brutal colisión, en vuelo rasante, de un planetesimal del tamaño de Marte, que arrancó el material que originó la Luna, dejando atrás una esfera deformada, de material fundido o semifundido, que tardó millones de años en enfriarse. De hecho, desde su formación, la Tierra estuvo sometida a la intensa radiación solar, y por tanto a grandes dosis de luz UV, (no existía todavía la capa de ozono). Estaba muy caliente, no solo por causa de esta radiación que recibía del Sol, sino también por las tremendas colisiones con planetesimales e infinidad de cometas y asteroides, y finalmente por la desintegración de los materiales radiactivos que contenía sobre su superficie y en su interior (tecnecio, torio, uranio, neptunio, etc.).

En este estado fundido o semifundido, a lo largo de millones de años se produjo el proceso de *diferenciación*. El hierro y el níquel, metales muy abundantes y de elevada densidad, se concentraron en el centro de la Tierra formando el *núcleo*, junto con otros como Co, Ru, Rh, Ir, etc., también muy densos y químicamente afines al Fe, los metales denominados *siderófilos* en la clasificación geoquímica de Goldschmidt. Los materiales menos densos como la sílice y otros óxidos, como los de aluminio, calcio, etc., el carbono elemental, el azufre elemental, o como sulfuro, el selenio o el arsénico, como seleniuros y arseniuros, etc., y los metales más ligeros como el aluminio, el magnesio, el sodio, el potasio, etc., formaron la corteza terrestre. La sílice, los óxidos del carbono y de otros elementos no metálicos como el nitrógeno o el fósforo, se combinaron con los metales más electropositivos, los denominados *litófilos* (alcalinos, alcalino-térreos, lantánidos, actínidos y otros), mientras que otros metales más pesados de la parte derecha de la Tabla Periódica, cadmio, mercurio, plomo, etc., es decir los *calcófilos*,

prefirieron combinarse con el azufre, el selenio, el arsénico, etc., formando los correspondientes sulfuros, seleniuros o arseniuros. La corteza terrestre está constituida fundamentalmente por sílice, silicatos y aluminosilicatos de metales alcalinos, alcalinotérreos y otros muy electropositivos. Por su parte, los elementos gaseosos y las moléculas volátiles que quedaron ocluidos en el interior del planeta, comenzaron a escapar en forma de múltiples e intensísimas erupciones volcánicas que se sucedieron a lo largo de cientos de millones de años y que todavía se producen en nuestros tiempos, aunque afortunadamente con frecuencia mucho menor.

Casi con toda seguridad, la primera atmósfera debió estar constituida por H_2 y He, que sin embargo escaparon pronto de la acción de la gravedad (velocidad térmica mucho mayor que la velocidad de escape de la tierra que es de 11.1 km/s), y también por vapor de agua NH_3 , CH_4 , CO_2 y otros gases (parece que permaneció algo del H_2 inicial, que pudo participar en muchas de las reacciones químicas que dieron origen a la vida). Durante estos cientos de millones de años, infinidad de cometas provenientes de la nube de Oort, del cinturón de Kuiper, o de algún otro cinturón de cometas, se precipitaron sobre la Tierra, y probablemente incorporaron gran parte del agua que existe en nuestro planeta (los cometas abundan por miles de millones en el sistema solar, y muchos de ellos como el Halley, están constituidos fundamentalmente por hielo), y también enormes cantidades de materia orgánica. Cuando la superficie terrestre se enfrió lo suficiente como para acoger agua en forma líquida en su superficie, tal vez unos 200 millones de años después de la formación del planeta, y cuando aún no se había producido la diferenciación completa del núcleo, el manto y la corteza terrestre, las inmensas cantidades de vapor de agua comenzaron a precipitarse sobre la corteza, en un diluvio interminable, de decenios, seguramente siglos de duración. Pero lejos de erradicar la vida, este acontecimiento la propició, y así, hace unos 3500 millones de años o tal vez 3800 millones, surgieron las primeras formas de vida.

Los microfósiles más antiguos que se han encontrado en la Tierra se hallan en los *estromatolitos*, rocas sedimentarias en forma de cúpula que provienen de la acción de las *cianobacterias* fotosintéticas (también llamadas *algas verdeazuladas*). Datan de unos 3.450 millones de años y por tanto se formaron más de 1000

millones de años después del sistema solar, con toda seguridad después del denominado período de “*bombardeo intenso o bombardeo pesado*” que terminó hace alrededor de 3800 millones de años, y una vez que hubieron desaparecido sus consiguientes efectos esterilizantes.

¿Pero, en realidad se desarrolló la vida en la Tierra? No queda hoy ninguna duda de que las moléculas inorgánicas y orgánicas necesarias, algunas de ellas simples, otras, en cambio, muy complejas, se produjeron en la *síntesis primordial*, en la Tierra primitiva, casi con toda probabilidad gracias a la acción de diversos compuestos inorgánicos, como silicatos y aluminosilicatos, y minerales sulfurados de Fe, Ni, Cu, etc., que actuaron unos a modo de plantilla en la generación de muchas de ellas, otros como catalizadores, o agentes de transferencia de electrones, que, asimismo, pudieron en parte llegar a la Tierra incorporados en meteoritos y en el polvo interplanetario. Pero se considera además posible que la vida llegara a la Tierra desde el espacio exterior. Este transporte de *esperma* desde fuentes extraterrestres se conoce como la hipótesis de la *panspermia*, y cuenta con apoyos científicos muy relevantes (F. Hoyle, F. Crick, L. Orgel y otros muchos renombrados investigadores). Pero tanto si es así como si no, quedan pocas dudas, o ninguna, sobre la llegada a nuestro planeta de moléculas esenciales para la vida (como los aminoácidos y sus precursores, entre otras muchas), periódicamente desde el espacio, transportadas por asteroides, meteoritos, cometas, etc. De hecho y como se indicó con anterioridad, gran parte del carbono terrestre y enormes cantidades de agua llegaron hasta nosotros desde el espacio exterior transportados por meteoritos, cometas y granos de polvo interplanetario. Por mencionar un ejemplo conocido, el cometa Halley, constituido principalmente por hielo, posee un contenido orgánico del 0.19%, que corresponde a casi la décima parte del contenido actual de biomasa de la Tierra.

En lo que se refiere a la generación en la Tierra de las moléculas prebióticas, se consideran en la actualidad dos aproximaciones, la primera basada en los experimentos de *Miller y Urey* y la segunda en el denominado *mundo de hierro y azufre*, propuesto por *Wächtershäuser*.

En la década de los años 1920, el bioquímico ruso A. Oparin, autor de un libro muy popular durante el

siglo XX —*El origen de la vida*—, propuso por primera vez que la Tierra recién formada debía contener una atmósfera reductora (metano y otros hidrocarburos; amoníaco, algo de H_2 . etc.), pero con cantidades importantes de H_2O y CO_2 y menores de otras sustancias orgánicas oxigenadas como alcoholes, cetonas y ácidos orgánicos. De forma independiente, el biólogo británico Haldane formuló ideas parecidas: atmósfera primitiva de CO_2 , vapor de agua y NH_3 , con muy poco oxígeno y por tanto sin la capa protectora de ozono. A lo largo de milenios se habrían producido infinidad de moléculas orgánicas a partir de estos gases por acción de las altas temperaturas, la radiación solar, los relámpagos y los rayos, etc., y con posteriori-

dad, la propia radiación ultravioleta proveniente del Sol habría transformado y descompuesto muchas de estas sustancias orgánicas de la superficie de la Tierra, convirtiendo estanques, lagos y lagunas en una especie de *caldo diluido y caliente*, del que podrían haber surgido las primeras moléculas de la vida. En palabras de Darwin, en pequeños estanques o lagunas (*little ponds*), repletos de sales de amonio y de fosfatos, con fuerte iluminación, calor, energía eléctrica (tormentas) y otros ingredientes, se podrían haber formado las proteínas y otras moléculas biológicas.

Había sin embargo muy poca evidencia experimental (por no decir ninguna) en apoyo de esta hipótesis, hasta que en 1952, un joven graduado de la Universidad de Chicago, Stanley Miller, y su supervisor de Tesis Doctoral, Harold Urey, Premio Nobel de Química en 1934 por su descubrimiento del deuterio, llevaron a cabo sus primeros experimentos en los que observaron la formación de diversos aminoácidos y otras sustancias orgánicas, a partir de una mezcla de los gases CH_4 , H_2 , H_2O y NH_3 , por acción de descargas eléctricas (Figura 7).

En fechas recientes, poco después de la muerte de Miller sucedida en 2007, la repetición de estos experimentos por otros investigadores discípulos de Miller, y su investigación mediante modernas técnicas de análisis, han demostrado la formación de 22 aminoácidos y otros productos orgánicos, entre ellos varias aminas.

Este experimento fue sólo el comienzo. Poco tiempo después, científicos alemanes (W. Groth, H. van Weyssenhoff, Universidad de Bonn) obtuvieron resultados similares empleando luz UV en lugar de descargas eléctricas, y sólo dos años más tarde, el bioquímico catalán Juan Oró, entonces en la Universidad de Houston, Texas, en un experimento de gran importancia demostró la formación de diversos aminoácidos, junto con adenina, a partir de una mezcla de HCN y NH_3 en agua. Muchos otros químicos obtuvieron resultados parecidos, que incluso alcanzan a la producción de nucleótidos (Figura 8), las unidades estructurales básicas del ADN y el ARN. Desde un punto de vista bioquímico, una vez formados los aminoácidos deben polimerizarse para formar péptidos, polipéptidos, proteínas, etc. Algunos ensayos recientes han demostrado que el sulfuro de carbonilo, un simple gas volcánico, es capaz de inducir la formación de

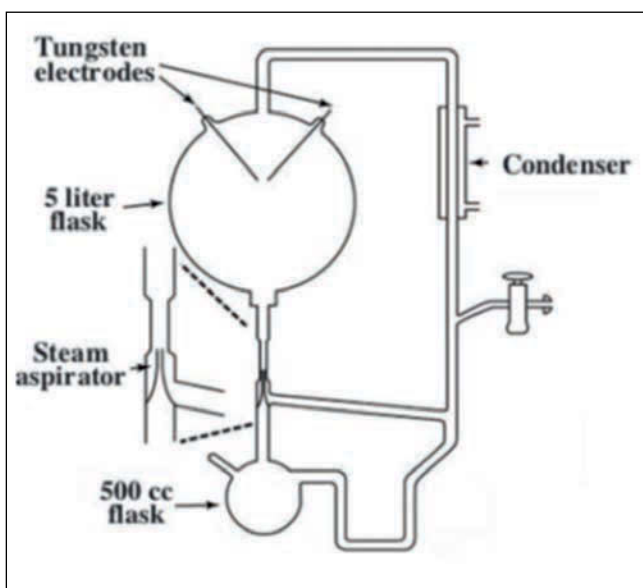


Figura 7. Experimentos de Miller.

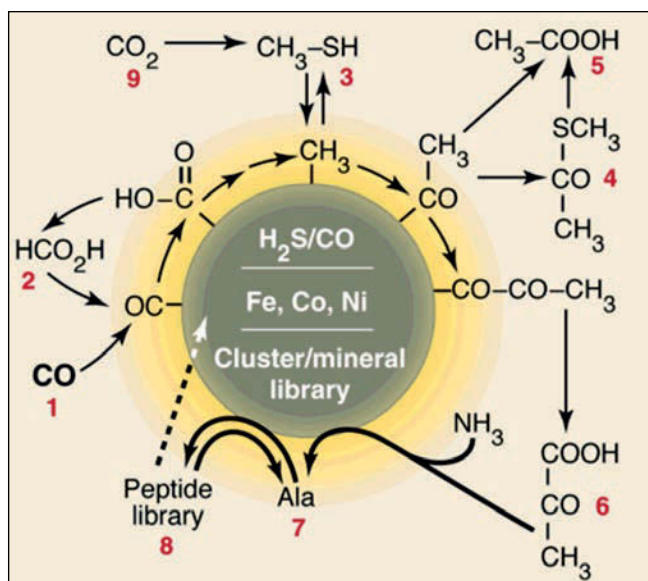


Figura 10. El organismo pionero de G. Wächtershäuser.

química resultan mas difíciles de justificar mediante datos fehacientes. Cómo a partir de los aminoácidos, las bases nitrogenadas y el ácido fosfórico se formaron los nucleótidos, y de su condensación los ácidos nucleicos, ADN y ARN; cómo estos polímeros biológicos que contienen millones de átomos se ensamblaron y se asociaron con otras moléculas orgánicas en recintos protegidos por membranas, formando entidades macromoleculares, capaces no sólo de autoorganizarse sino también de alimentarse, crecer y reproducirse, en definitiva cómo se formaron las células primitivas de las que surgió la vida, son cuestiones para las que hasta el presente sólo pueden ofrecerse explicaciones especulativas.

La aparición de la vida requirió que estos agregados moleculares consiguieran la capacidad de desarrollar de forma simultánea los siguientes procesos:

Metabolismo, o sea, la realización de procesos químicos como la síntesis y la transformación, y en muchos casos degradación, de especies químicas, a través de reacciones redox, o de otra clase. El metabolismo garantiza el suministro de especies químicas esenciales, la fragmentación gradual de las moléculas complejas a otras más sencillas con producción de energía (*catabolismo*), y la eliminación de los deshechos químicos que son innecesarios o incluso nocivos. El balance energético del metabolismo es siempre de consumo de energía y por ello

se requiere un aporte externo, que puede proceder de la luz, el calor, la energía química o la energía eléctrica.

Reproducción o capacidad de autorreplicación acoplada con la transferencia de información genética desde el *organismo progenitor* a sus *descendientes*. Para ello se necesita heredar la información genética (en forma de ARN o ADN) de manera esencialmente inalterada.

Evolución, o aptitud para adaptarse a los cambios ambientales y sobrevivir en competencia con otras formas de vida. Se consigue potenciando pequeñas deficiencias en la transferencia de información durante la replicación, que pueden ser beneficiosas para el organismo. Por tanto, la evolución está estrechamente relacionada con las imperfecciones de la autorreplicación.

Para muchos, en algunas etapas de esta complejísima transformación, y tal vez en muchas otras anteriores, desde el mismo principio del Universo, es decir, desde el *Big Bang*, se produjo una intervención sobrenatural, la actuación de Dios, que llevó a cabo las acciones necesarias para alcanzar el final que conocemos. Para otros muchos, la vida surgió como resultado de un tiempo de desarrollo químico y después bioquímico que en nuestra escala de tiempo aparece como infinitamente largo; de la propia tendencia natural de las moléculas a combinarse unas con otras de acuerdo con su afinidad química, y sobre todo de la evolución y la selección natural. Todos estos acontecimientos originaron la vida en la extraordinaria complejidad con que se presenta ante nuestros ojos.

Sea como fuere se generaron hace unos 3500 millones de años las primeras células primitivas de las que surgirían las primeras formas de vida, probablemente bacterias microscópicas semejantes a las actuales, pero con un grado de evolución muy inferior. Esta vida primitiva fue casi con toda seguridad anaerobia, puesto que no había O_2 en la atmósfera. Con el paso del tiempo las primeras formas de vida aprendieron a utilizar la inagotable energía que recibían del Sol para convertir el CO_2 y el H_2O , ambas sustancias abundantísimas, en hidratos de carbono y oxígeno mediante la fotosíntesis, que desde entonces desarrollan diversos organismos, en particular las plantas terrestres, las algas y algunas bacterias. Poco a poco, la

corteza terrestre fue cambiando como consecuencia de la oxidación de muchos de sus componentes, y lo mismo sucedió con las aguas continentales y marinas, cuyos metales disueltos (por ejemplo las sales de hierro) precipitaron como óxidos, hidróxidos, u otros compuestos. Y fue entonces cuando poco a poco también, el oxígeno comenzó a colonizar nuestra atmósfera, que se fue enriqueciendo en él, y también, en nitrógeno (este último procedente en parte de erup-

ciones volcánicas, y en gran medida de la descomposición de compuestos orgánicos nitrogenados). Pronto se formó la capa de ozono que protegió la superficie de la Tierra de los rayos ultravioleta del Sol. Y así, a lo largo de millones de años, evolucionó nuestro planeta hasta convertirse en el actual “*planeta azul*”, una extraña, aunque hermosísima singularidad cósmica, no sólo en el Sistema Solar sino también en la parte del Universo que conocemos.