

Este artículo se publicó en el Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid para el año 2020.

The Origin of the Solar System Elements

1 H	4 Be	big bang fusion 	cosmic ray fission 	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	2 He	
3 Li	merging neutron stars? 	exploding massive stars 	exploding white dwarfs 	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
11 Na	12 Mg	dying low mass stars 		26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	
55 Cs	56 Ba	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	
87 Fr	88 Ra										
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	Very radioactive isotopes; nothing left from stars			

Graphic created by Jennifer Johnson
<https://www.astronomy.ohio-state.edu/~jaj/nucleo/>

Astronomical Image Credits:
 ESA/NASA/AASNOVA

NUESTROS ORÍGENES CÓSMICOS

Belén Tercero

*Observatorio Astronómico Nacional - Observatorio de Yebes
Instituto Geográfico Nacional - Ministerio de Fomento*

Introducción

En este artículo, repasaremos algunos aspectos fundamentales para comprender la complejidad química del universo. Esta es una cuestión de gran interés: como todos sabemos, “somos polvo de estrellas” tal y como decía Carl Sagan, pero resulta complicado hallar la conexión entre la formación de los elementos químicos y de moléculas en el universo y la complejidad química y biológica de la Tierra, de la que nosotros formamos parte. Con el fin de ahondar en esta conexión, vamos a hacer un recorrido general sobre la síntesis de átomos y especies moleculares en el espacio exterior, recordando que toda esta evolución química constituye la base de la complejidad de la vida de nuestro planeta.

Para poder llevar a cabo esta tarea, tendremos que viajar por múltiples momentos y objetos diferentes del cosmos. Nos remontaremos a los inicios del universo para detenernos en la formación de los constituyentes de los elementos químicos y de los átomos más sencillos. Haremos una breve parada en el alba cósmica, donde surgieron las primeras estrellas del universo y el procesamiento de nuevos elementos. Las distintas maneras en que las estrellas viven y finalizan sus vidas y eventos cataclísmicos como la fusión de estrellas de neutrones, nos proporcionarán la explicación del origen de los múltiples elementos de la tabla periódica. En este momento, pasaremos a fijarnos en los objetos más fríos del cosmos porque es en ellos donde se encuentran gran variedad de especies moleculares, muchas de ellas, moléculas orgánicas complejas. Así, explicaremos la formación de moléculas en nubes del medio interestelar que albergan la formación

de estrellas y planetas. Finalmente, actuando como nexo entre el espacio y nuestro planeta discutiremos la complejidad química hallada en los cometas y los meteoritos.

Los primeros átomos

Podríamos decir que el constituyente básico de la materia ordinaria es el átomo, y, como sabemos, el átomo se compone de protones, neutrones y electrones. Efectivamente, existen partículas más fundamentales, los quarks, de las que se componen tanto protones como neutrones, pero vamos a comenzar el camino de nuestros orígenes cósmicos con la creación de los primeros núcleos atómicos, es decir, con la unión de protones y neutrones. Como ya hemos adelantado, de manera inevitable, nos tenemos que remontar a los inicios del universo (figura 1).

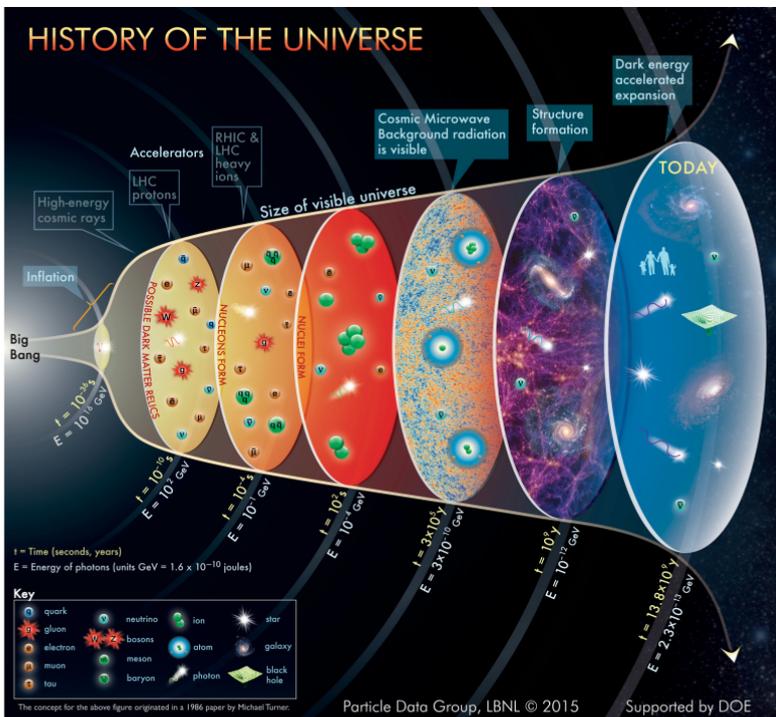


Figura 1: Recreación de la historia del universo. Crédito: Particle Data Group at Lawrence Berkeley National Lab.

Poco tiempo después del Big Bang, las (anti-)partículas podían crearse a partir de energía térmica. La temperatura era tan elevada que la materia y la antimateria estaban en equilibrio con la radiación. Debido a la expansión, la temperatura disminuyó hasta un punto en que desapareció este equilibrio y las partículas y antipartículas existentes ya solo podían aniquilarse entre ellas o decaer¹. Además, en este punto parece que existió una pequeña asimetría en la tasa de decaimiento de materia y antimateria, primando una sobre la otra, en una proporción de $1/10^9$. Es decir, de esa pequeña proporción de materia en exceso se compone todo el universo que conocemos.

Así, al finalizar lo que se llama la era leptónica (con el universo a una temperatura de 10^{10} K y un tiempo de vida de 1 segundo después del Big Bang) la antimateria desaparece y todo será formado a partir de protones, neutrones y electrones. Desde este momento hasta unos 10 segundos después del Big Bang, los protones y neutrones se mantenían en equilibrio dado que la energía térmica del universo era superior a la diferencia de masa entre ambos. Cuando la temperatura descendió y cesó la reacción que mantenía a estas partículas en equilibrio, los protones y neutrones aislados ya solo podrían decaer. Mientras que el protón puede considerarse como una partícula estable, el neutrón, por el contrario, si se encuentra aislado, decae en un protón con un tiempo característico de unos quince minutos (890 s). Es decir, si no hubiera otras reacciones que estabilizaran a los neutrones, todos los neutrones se hubieran convertido en protones y no habría más átomos que el hidrógeno: todo el universo estaría constituido de hidrógeno (¡qué distinto habría sido todo!). Pero afortunadamente para nosotros, creemos, existe una reacción que estabiliza a los neutrones, la formación de un núcleo de deuterio² (^2H). A un tiempo de 100 segundos después del Big Bang, la reacción que permite unirse a los protones y los neutrones va en un solo sentido, produciendo núcleos de deuterio y de helio (ver figura 2).

En ese momento la proporción de helio con respecto hidrógeno que se formó fue de un 25% en masa. Esa proporción se observa cuando se estudia la composición de galaxias lejanas, lo que es un gran éxito para la teoría del Big Bang y de la nucleosíntesis primordial. En este punto también se formaron algunos núcleos de elementos livianos: litio e isótopos de berilio. Para la creación de elementos más pesados tenemos que esperar a la formación de las primeras estrellas del universo. De todos los elementos conocidos, solo el hidrógeno y el helio se formaron en proporciones significativas en los primeros segundos del universo. Es más, to-

¹Esta temperatura es diferente dependiendo de las partículas: para los bariones (protones, neutrones y sus correspondientes antipartículas) se da a unos 10^{13} K, a un tiempo de 10^{-5} s después del Big Bang, mientras que para los leptones (electrones y positrones) se da a una temperatura de 10^{10} K y a un tiempo de 1 s después del Big Bang ($0\text{ K} = -273,15\text{ }^\circ\text{C}$).

²El deuterio es un isótopo del hidrógeno. Mientras que el núcleo del átomo de hidrógeno se constituye tan solo de un protón, el de deuterio consta de un protón y un neutrón.

do el hidrógeno que existe en el universo se formó en esta nucleosíntesis primordial.

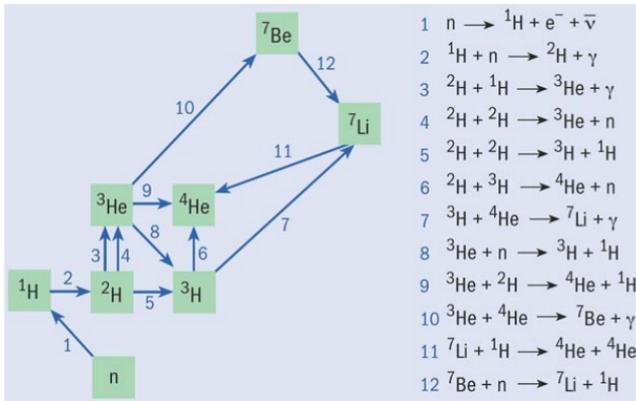


Figura 2: Nucleosíntesis primordial. Crédito: <https://physicsworld.com/a/testing-the-elements-of-the-big-bang/>

Recordemos que hasta ahora solo hemos formado los núcleos de estos átomos. En esta época del universo, los núcleos y los electrones no están ligados. La radiación tiene suficiente energía para disociar los encuentros casuales entre por ejemplo, un protón y un electrón, para formar un átomo de hidrógeno. Los fotones que componen esta radiación, a su vez, son absorbidos rápidamente en estos encuentros. El cambio ocurre cuando la temperatura del universo cae a 3 000 K y este tiene 300 000 años, el momento de la gran recombinación. La radiación pierde energía, ya no puede disociar a los átomos que se forman en los encuentros entre núcleos y electrones, y los fotones ya no serán rápidamente absorbidos pudiendo escapar y llenar el universo³. En este momento la radiación se desacopla de la materia y existe en el universo una niebla oscura de átomos de hidrógeno y de helio.

³En efecto, como esta radiación ya no es absorbida llena y llenará siempre el universo. Es lo que conocemos como la radiación de fondo cósmico de microondas. En nuestros días esta radiación tiene una temperatura de 2.7 K; su temperatura ha caído un factor 1 000 desde la época de la gran recombinación, ya que el tamaño del Universo ha sido multiplicado por este mismo factor desde entonces. En los años de la década de 1960, Robert Dicke y James Peebles predijeron la existencia de esta radiación de fondo en el rango de frecuencia de las microondas y se embarcaron en la construcción de una antena para confirmar esta predicción. Sin embargo, fueron adelantados, por casualidad, por dos ingenieros, Arno Penzias y Robert Wilson que habían construido una antena de microondas destinada a recibir las señales del primer satélite de comunicación. En mayo de 1965, observaron una señal que presentaba la particularidad de ser idéntica en todas las direcciones del cielo. Tras un tiempo en el que los ingenieros revisaron el sistema de recepción con el fin de encontrar algún tipo de fallo que diera lugar a esta “anomalía”, la señal fue fácilmente explicada cuando Penzias y Wilson tuvieron conocimiento de los trabajos de Dicke y Peebles. Este descubrimiento constituyó un éxito brillante para la teoría del Big Bang.

El alba cósmica

Nos encontramos en la edad oscura del universo. Como hemos dicho, tras el momento de la gran recombinación, una niebla de átomos de hidrógeno y helio llenaba el espacio sin emitir luz. La congregación de estos elementos en ciertas regiones tuvo que dar lugar a las primeras estrellas. No será hasta que se forme esta primera generación de estrellas que existan elementos más pesados en el cosmos.

Sin embargo, las primeras estrellas tuvieron que formarse de una manera muy diferente a como nacen las estrellas en nuestra galaxia. Dado que el gas reflejaba la composición de la nucleosíntesis primordial, este carecía de carbono y oxígeno. Especies que contienen estos elementos actúan como refrigerante del gas en las nubes de nuestra galaxia, permitiendo que este llegue a temperaturas de unos 10 K y nubes de masa no muy elevada puedan colapsar dando lugar a la creación de estrellas como nuestro Sol. En aquel universo lejano, el gas solo podía enfriarse hasta unos 100 K, lo que implica que la masa de materia necesaria para colapsar y convertirse en una estrella fuera mucho mayor. Es por ello que las primeras estrellas del universo debieron de ser estrellas muy masivas (figura 3).

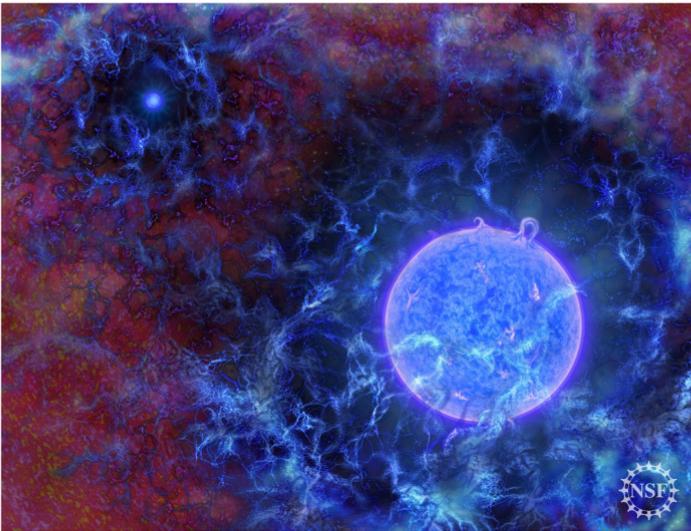


Figura 3: Recreación de las primeras estrellas del universo. Los filamentos representan el gas frío de alrededor absorbiendo la luz ultravioleta de estas primeras estrellas. Crédito: N. R. Fuller, National Science Foundation.

Existen varias incógnitas en torno al tiempo en que estas estrellas se formaron y la manera en que lo hicieron. Es por ello, que la búsqueda de respuestas en torno a estas cuestiones constituye un campo de investigación fascinante y de plena actualidad. Apenas hace un año, se realizaron unos descubrimientos importantes en relación a esta primera generación de estrellas.



Figura 4: Radiotelescopio de Murchison en Australia. Crédito: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia.

En febrero de 2018 se detectó lo que parece una huella de las primeras estrellas del cosmos. La idea consistía en detectar la señal causada por la línea de 21 cm de hidrógeno, asociada al gas de los alrededores calentado por la radiación de estas estrellas. Para el propósito se construyó un radiotelescopio que opera a muy baja frecuencia en Murchinson⁴, en pleno desierto occidental australiano (figura 4). El aislamiento del instrumento era un requisito necesario para minimizar las interferencias debidas a las comunicaciones terrestres. Los investigadores de este trabajo detectaron una absorción a 78 MHz lo que implica que la señal provenía de un tiempo de 180 millones de años después del Big Bang⁵. Este tiempo es compatible

⁴El mismo lugar donde fue hallado el meteorito del que hablaremos más adelante.

⁵En un sistema en reposo la señal aparecería a 1420 MHz (equivalente a una longitud de onda de 21 cm). Por el efecto Doppler, la señal nos llega a una frecuencia diferente si la fuente de emisión se está alejando o acercando con respecto a nuestra posición. La expansión del universo permite relacionar la frecuencia de la señal recibida y la edad del universo en el momento de la emisión de la señal.

con el tiempo de la formación de las primeras estrellas según los modelos teóricos del universo⁶.

Conectando de manera especial con el propósito de este artículo, en el verano de 2018, otro equipo de investigadores, utilizando el interferómetro ALMA y el telescopio VLT, detectó una señal de oxígeno (¡ya no solo tenemos hidrógeno y helio!) a solo 500 millones de años después del Big Bang, en una de las galaxias más lejanas conocidas, MACS1149-JD1. Por tanto, esta galaxia ya presenta una población de estrellas maduras e incluso ha debido existir una generación previa de estrellas en esa galaxia. Con esta observación, estos investigadores proponen el alba cósmica en un tiempo de unos 250 millones de años después del Big Bang.

De este modo, de acuerdo con los resultados más recientes, tras unos 200 millones de años después del Big Bang ya tenemos estrellas en el universo. Es el momento, por tanto, de adentrarnos en cómo el resto de los elementos químicos han sido formados.

Los elementos de la tabla periódica

Como confiesa Jennifer Johnson⁷, un astrónomo solo reconoce tres elementos en la tabla periódica: hidrógeno, helio y “metales”. Generalmente, referimos como metales no solo el oro, estaño, plata o cobre, por ejemplo, sino también el oxígeno, el neon, el cloro... El esquema de nombres funciona realmente bien si dividimos los elementos entre aquellos formados en la nucleosíntesis primordial poco después del Big Bang y todos los demás. Pero, por supuesto, como podemos intuir, la división no es tan sencilla si tratamos de buscar los orígenes de cada uno de estos “metales”.

En 2008, las astrónomas Jennifer Johnson e Inese Ivans⁸ se embarcaron en la tarea de identificar el origen cósmico de los elementos de la tabla periódica. En la figura 5 se muestra un primer borrador de ese trabajo donde marcan los procesos nucleares que dan lugar a la creación de muchos de los elementos químicos. El desafío consistía en identificar qué tipo de proceso nuclear se da en las distintas fases de la evolución estelar y en qué proporción, con respecto a la abundancia que presentan en el sistema solar, se crean los elementos en cada una de las fases.

Recordemos que nos habíamos quedado en el alba cósmica y en la formación de las primeras estrellas masivas compuestas de hidrógeno y

⁶Otro resultado muy significativo de esta investigación es que el gas de aquel universo podría estar más frío de lo que predicen los modelos (3 K frente a 7 K). Si esto se confirmara, los investigadores proponen la materia oscura como responsable de ese enfriamiento.

⁷Ohio State University

⁸University of Utah

helio. Como ya hemos adelantado, el resto de los elementos químicos se forman en el interior de las estrellas, en la forma de morir de estas y en procesos de fusión de remanentes estelares. La producción de cada uno de los elementos es debida a procesos nucleares distintos y estadios diferentes de evolución estelar. En la muerte de las estrellas, el nuevo material procesado es devuelto al medio interestelar y formará parte de la composición de la nueva generación de estrellas. De esta manera, las estrellas de una nueva generación serán más ricas en metales que sus antecesoras. La figura 6 muestra el ciclo de la vida de las estrellas: su vida, los elementos procesados en el interior y su fase final dependerán de la masa con la que se ha formado. La vida media de una estrella masiva es mucho menor que la de una estrella como nuestro Sol. Mientras que una estrella como nuestro Sol vive un tiempo de unos 10 000 millones de años, una estrella con 20 veces la masa del Sol lo hará tan solo 10 millones de años. Por otro lado, mientras que las estrellas masivas terminan sus vidas explotando como supernovas tipo II, dejando un remanente que, dependiendo de la masa, será un agujero negro o una estrella de neutrones, las estrellas poco masivas, al final de sus vidas, expulsan su envoltura de manera no explosiva durante la fase de gigante roja. El remanente, una enana blanca, podrá ir enfriándose poco a poco o, si forma parte de un sistema binario, podrá acretar materia o fusionarse con otra enana blanca y terminar explotando como una supernova tipo I.

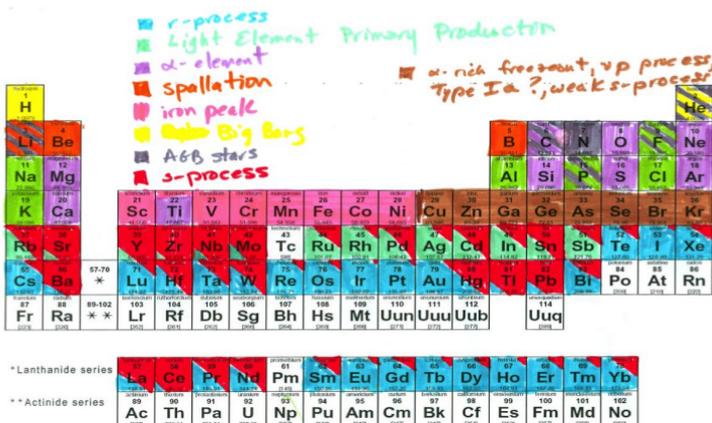


Figura 5: Primera versión del origen de los elementos de la tabla periódica realizada por J. Johnson e I. Ivans en 2008. Crédito: Jennifer Johnson and Inese Ivans.

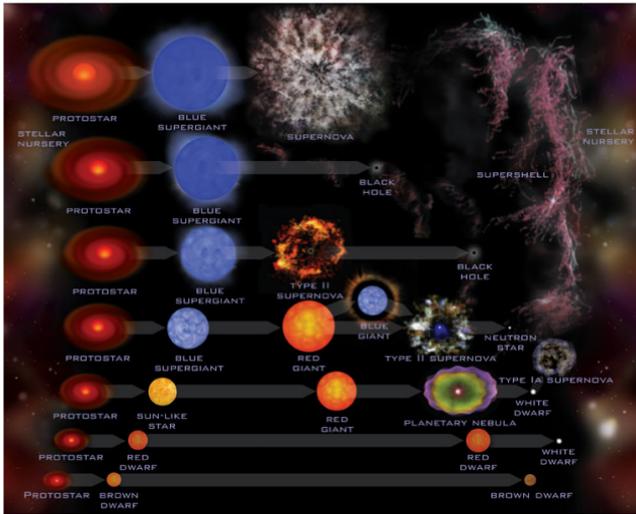


Figura 6: Ciclo de la vida de las estrellas. Crédito: <https://www.universetoday.com/24629/life-cycle-of-stars/>

Teniendo en mente la evolución estelar, es fácil entender la versión actual de la tabla periódica realizada por Jennifer Johnson (ver figura 7). En ella podemos visualizar el origen cósmico de los elementos químicos.

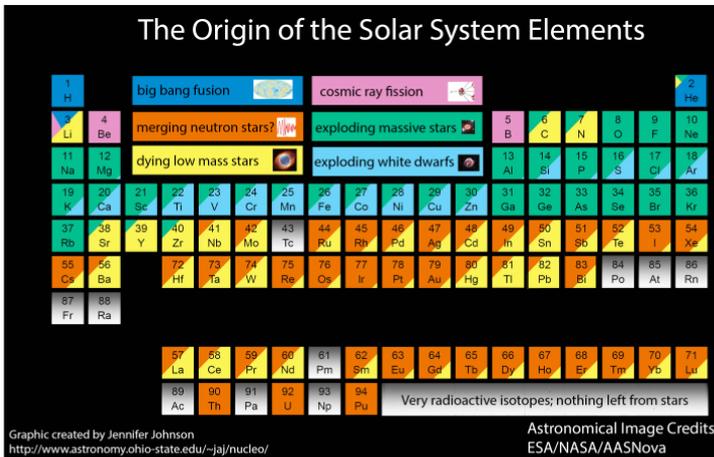


Figura 7: La tabla periódica con el origen cósmico de los elementos realizada por J. Johnson. Crédito: ESA/NASA/AASNova.

Siguiendo la evolución del universo, los primeros elementos que debieron enriquecer el medio interestelar fueron aquellos procesados en el interior de las estrellas masivas eyectados por medio de la explosión de supernova y en la nucleosíntesis adicional producida durante este evento. En el interior de las estrellas masivas, la reacción de fusión nuclear que predomina es el ciclo CNO, donde el hidrógeno se convierte en helio y el carbono actúa como catalizador⁹. Una vez que se agota el hidrógeno en el núcleo, la fusión procede en múltiples capas alrededor del núcleo donde en cada una de ellas se produce la quema de un elemento. Reacciones de fusión de helio producen carbono (reacción triple *alpha*), el carbono se fusiona obteniéndose oxígeno, magnesio, neon y sodio, y reacciones nucleares de oxígeno producen azufre, silicio y otros elementos. Tras la quema de oxígeno, el núcleo alcanza una temperatura tan elevada que el silicio y el azufre se fusionan con partículas ligeras para crear elementos como hierro y níquel. Estos elementos son los más pesados que se producen a través de reacciones de fusión nuclear en los interiores estelares.

Cuando la estrella ha quemado todo el silicio, esta se aproxima a su explosión como supernova. Las supernovas tipo II enriquecerán el medio interestelar: (1) la explosión eyectará los elementos producidos durante la vida de la estrella; (2) las ondas de choque causadas darán lugar a una nucleosíntesis adicional; y (3) algunas partículas ligeras serán aceleradas a velocidades próximas a la de la luz, creando los rayos cósmicos, que mediante fisión producen elementos como litio, berilio y boro¹⁰.

Por tanto, el universo en sus inicios se enriqueció con elementos procesados en las estrellas masivas y en su muerte como supernovas. Gracias a los metales procesados en esta primera generación de estrellas, los procesos de formación estelar se vieron modificados permitiendo la creación de estrellas poco masivas en la segunda generación de estrellas. Sin embargo, antes de que la vida de estas primeras estrellas poco masivas llegara a su fin, otros eventos cataclísmicos tuvieron lugar y crearon nuevos elementos. Como nuestras primeras estrellas masivas ya han estallado como supernova, los objetos remanentes, agujeros negros y estrellas de neutrones, pueden quedar atrapados en un sistema binario. La emisión de ondas gravitacionales llevará las órbitas de estos objetos cada vez más cerca, pudiendo fusionarse en un tiempo de 10 millones de años después de que comenzara la formación estelar.

La mayoría de los elementos más pesados que el níquel se forman, fundamentalmente, mediante la captura de neutrones a través de los procesos *s* (*slow*) y *r* (*rapid*). Sin embargo, para que se den estos procesos debe existir un flujo de neutrones libres. Después de la nucleosíntesis

⁹La primera generación de estrellas masivas tuvo que crear carbono mediante una primera fusión del helio para poder llevar a cabo esta reacción en el interior.

¹⁰Veremos también el papel fundamental de los rayos cósmicos en la creación de moléculas en las nubes moleculares del medio interestelar.

primordial, esto solo se da en determinadas circunstancias: principalmente en la explosión provocada por la colisión de estrellas de neutrones, denominada kilonova (donde predomina el proceso r) y en las fases finales de la vida de las estrellas poco masivas (donde predomina el proceso s)¹¹. En las explosiones de supernova, aunque se puede dar una pequeña proporción de elementos creados por captura de neutrones, la mayoría de los neutrones no son liberados en la explosión, quedando atrapados en el objeto remanente.

Hasta hace poco más de dos años, se desconocía el origen de, por ejemplo, un elemento como el oro, tan apreciado en nuestro planeta. En el otoño de 2017 con la detección de ondas gravitacionales de estrellas de neutrones en colisión se abrió una nueva vía. El estudio posterior de los datos de este evento cataclísmico confirmó la teoría de que estas inusuales explosiones estelares bombean vastas cantidades de oro y elementos pesados creados por procesos r (figura 8). En estas reacciones, el núcleo atómico agrega una gran cantidad de neutrones antes de que el núcleo decaiga con desintegraciones β , con lo que se crea un núcleo muy rico en neutrones y altamente inestable.

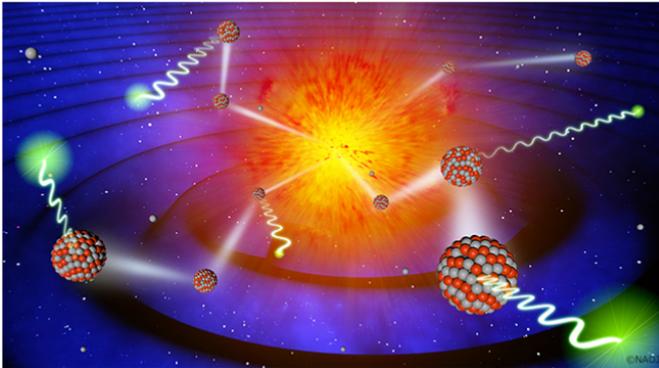


Figura 8: Recreación de síntesis de elementos por procesos r durante la fusión de dos estrellas de neutrones. Crédito: NAOJ.

Si nos fijamos de nuevo en la figura 7, sin la ayuda de las estrellas poco masivas, pueden ser procesados prácticamente todos los elementos de la tabla periódica (aunque no todos los isótopos). Los elementos creados por las estrellas poco masivas contribuyeron al enriquecimiento

¹¹En los últimos años, también está empezando a cobrar protagonismo los procesos i (*intermediate*, pero también *interesting*, *important*...), ya que existen abundancias significativas de elementos que no pueden explicarse mediante procesos s creados en las fases finales de las estrellas poco masivas y de masa intermedia.

del medio cuando el universo ya contaba con 10 000 millones de años, más de la mitad de su edad actual. La nucleosíntesis en el interior de las estrellas poco masivas cesa con la producción de carbono y oxígeno, y, por tanto, no contribuyen con los elementos del pico del hierro. La estrella termina su vida eyectando de manera pausada su envoltura. Estas estrellas contribuyen al enriquecimiento del medio con grandes cantidades de helio, carbono y nitrógeno producidos en procesos nucleares en la envoltura (el carbono y el oxígeno producidos en el interior quedan atrapados en su remanente, la enana blanca). Además, estas estrellas también participan del enriquecimiento del medio en elementos más pesados que el níquel: ciertas reacciones nucleares producen un exceso de neutrones que reaccionan con hierro y otros núcleos que fueron formados en generaciones de estrellas anteriores. En estas estrellas interviene el proceso *s*: el núcleo atrapa un neutrón por semana o mes. Si con el neutrón atrapado el núcleo se vuelve inestable, se producirán desintegraciones *beta* que transformarán un neutrón en un protón, dando lugar a un átomo distinto. Generalmente, esto tiene lugar antes de que el núcleo atrape un nuevo neutrón.

Finalmente, si el remanente, la enana blanca, acreta materia, se puede producir la ignición del carbono y el oxígeno dando lugar a elementos como silicio y hierro. Esta nucleosíntesis explosiva dura tan solo unos segundos y da lugar a las supernovas tipo I. La explosión eyecta el material al medio. En estas explosiones no se producen elementos más pesados ya que no existe un flujo de neutrones libres.

A pesar de que, de manera individual, las estrellas masivas contribuyen con una proporción mayor de metales al medio, después de la primera generación de estrellas, se forman muchas más estrellas poco masivas que masivas, por lo que las estrellas poco masivas en conjunto contribuyen de manera muy significativa a las abundancias de los elementos medidas en el sistema solar.

El universo molecular

Hemos visto el origen de los elementos químicos, sin embargo, cuando nos referimos a la complejidad química del universo, no solo nos referimos a la variedad de elementos químicos, sino a cómo estos átomos se han unido para dar lugar a estructuras tan complejas como las que alberga nuestro planeta. Por ejemplo, el ADN, molécula básica para la vida, está tan solo formado por hidrógeno, oxígeno, carbono, nitrógeno y fósforo (figura 9).

Para estudiar esta complejidad química hay que adentrarse en el universo molecular. Es en las regiones más frías del universo donde encontramos una gran variedad de especies moleculares. La información sobre este universo la recibimos en forma de radiación electromagnética de baja frecuencia, en el dominio de las ondas de radio. El campo de estudio

de la astrofísica molecular es, por tanto, relativamente joven: esta disciplina empezó a cobrar relevancia a medida que fueron desarrolladas las técnicas de observación radioastronómicas.

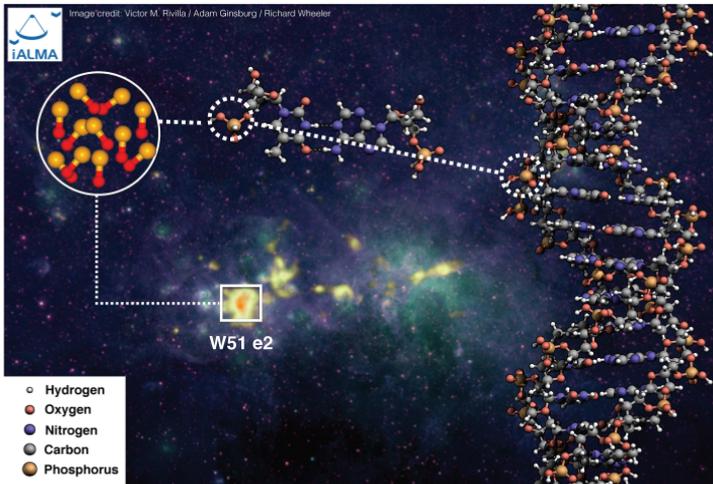


Figura 9: Recreación de la detección de la molécula de PO en la región de formación de estrellas masivas W51 e2. La imagen muestra que esta molécula es uno de los constituyentes de la molécula de ADN. Crédito: V. M. Rivilla, A. Ginsburg, R. Wheeler.

La primera detección de ondas de radio de origen extraterrestre fue realizada por Karl G. Jansky en la década de 1930, mientras llevaba a cabo su trabajo para los laboratorios Bell sobre interferencias atmosféricas en las comunicaciones transatlánticas. Grote Reber, haciéndose eco de este hallazgo, construyó una antena parabólica de 9 m de diámetro con el fin de realizar observaciones astronómicas (figura 10). En 1944, Reber consiguió publicar el trabajo de sus observaciones en el *Astrophysical Journal*, constituyéndose como el primer artículo científico que trataba sobre la emisión radio del espacio exterior.

En la década de 1960, junto con el gran desarrollo en la instrumentación, la radioastronomía experimentó varios de sus grandes hitos: los descubrimientos de los cuásares, galaxias muy lejanas que figuran entre las fuentes más brillantes del universo, de los púlsares o estrellas de neutrones que giran a gran velocidad emitiendo pulsos de ondas de radio, y de la radiación de fondo cósmico de microondas, que supuso la primera prueba sólida a favor de la teoría del Big Bang. En relación con el universo molecular, en esta misma década se detectó por primera vez una molécula en el medio interestelar mediante técnicas de radio,

el radical hidroxilo (OH). Pero fue en los años de la década de 1970 (y finales de los 60) cuando comenzó la auténtica revolución de las detecciones moleculares¹²: amoníaco (NH_3), agua (H_2O), formaldehído (H_2CO), monóxido de carbono (CO), y muchas otras, la mayoría de naturaleza orgánica.

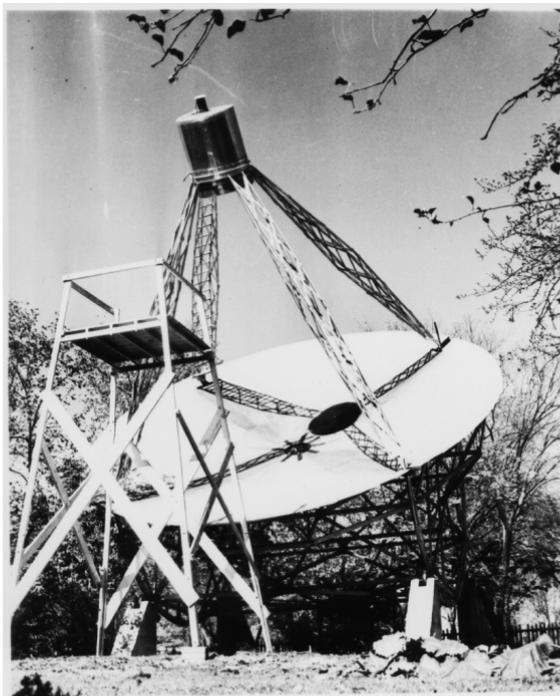


Figura 10: Telescopio construido por Grote Reber en 1937 en el patio trasero de su domicilio en Wheaton (Chicago), Illinois. Crédito: NRAO.

Estos descubrimientos dieron lugar a una nueva rama de la astrofísica: la astrofísica molecular. Hoy en día sabemos que las moléculas existen en el universo en aquellas regiones con temperaturas menores de unos 2 000 K¹³

¹²En general, las detecciones moleculares en el dominio de las ondas de radio se realizan a través del espectro rotacional de las especies. Estas moléculas detectadas, por tanto, se encuentran en fase gaseosa.

¹³Este valor depende de varios factores, como, por ejemplo, de la densidad del medio, y puede haber desviaciones significativas con respecto al número aquí presentado como estándar.

y tiempos de vida suficientemente largos como para permitir que se den las reacciones químicas. El tiempo de vida es una variable muy a tener en cuenta, pues en la mayoría de las regiones donde se detectan las moléculas en el espacio las densidades son extremadamente bajas. En general son del orden (o menores) del mejor vacío que se puede conseguir en la tierra con la tecnología más sofisticada. Por tanto, para que dos partículas se encuentren y reaccionen, suelen transcurrir tiempos muy elevados. En general los ambientes del medio interestelar donde encontramos moléculas son muy hostiles: por ejemplo, las nubes moleculares oscuras, lugares donde se da la formación de estrellas como nuestro Sol, tienen unas densidades típicas de apenas 10^4 partículas por cada cm^3 y unas temperaturas que rondan los 10 K.

En la actualidad, hay aproximadamente 200 especies moleculares distintas observadas en el espacio. La mayoría de las especies detectadas son orgánicas, es decir, basadas en carbono. Hay muy pocas detectadas con más de 12 átomos: solo los furelenos¹⁴ (C_{60} y C_{70}), el benzonitrilo ($\text{c-C}_6\text{H}_5\text{CN}$) y los PAHs. Los PAHs (por sus siglas en inglés), hidrocarburos policíclicos aromáticos¹⁵, son grandes moléculas que contienen varios anillos aromáticos en su estructura. Se estima que los PAHs del medio interestelar cuentan, aproximadamente, con 50 átomos de carbono. Se observan, principalmente, en las fronteras de nubes moleculares donde incide radiación ultravioleta proveniente de estrellas próximas. En la Tierra, podemos encontrarlos tanto en combustibles fósiles (petróleo, carbón) como en los productos de su combustión. Aunque los PAHs se detectan de forma rutinaria en el espacio, tanto su formación como su enorme abundancia continúan siendo un misterio.

A pesar de la complejidad de los distintos mecanismos químicos que gobiernan la producción de moléculas en el espacio, existen algunas ideas básicas que nos pueden ayudar a entender cómo moléculas tan complejas existen en el medio interestelar¹⁶.

(1) Como cabría esperar, la molécula más abundante en el universo es el hidrógeno molecular, H_2 . A partir de nubes de hidrógeno molecular se forman las estrellas. Paradójicamente, la formación del H_2 en el espacio es muy complicada: en las condiciones de presión y temperatura típicas

¹⁴En la tierra estas moléculas son usadas en medicamentos antivirales y como superconductores a alta temperatura. El hallazgo de sus altas abundancias en el espacio abre nuevas vías de investigación para producirlos de manera masiva, ya que en la actualidad se producen tan solo en cantidades de un gramo.

¹⁵La detección de estas especies se lleva a cabo mediante su espectro de vibración en el dominio del infrarrojo. Por tanto, se conoce su existencia por las bandas moleculares observadas, pero se desconoce la composición exacta de estas moléculas.

¹⁶En esta sección nos centramos especialmente en entender la química de las nubes moleculares por su conexión directa con la formación de sistemas planetarios. Sin embargo, existen otros tipos de regiones en el espacio donde se encuentran gran variedad de moléculas, por ejemplo, en las envolturas circunestelares de estrellas evolucionadas

del medio interestelar, H_2 solo se forma eficientemente en la superficie de los granos de polvo que actúan de catalizadores. Se podría decir que el mecanismo es el siguiente: dos átomos de hidrógeno se posan sobre la superficie de los granos y, en ella, tienen movilidad suficiente para poder encontrarse y reaccionar. La energía liberada en la reacción permite que la molécula de H_2 sea devuelta a la fase gaseosa. El polvo representa tan solo un 1% de la materia del medio interestelar, y sin embargo, su presencia es esencial para entender la química en el espacio.

(2) Una vez que tenemos formado H_2 , la química interestelar comienza por la acción de los rayos cósmicos que pueden penetrar en el interior de las nubes moleculares causando la ionización de este compuesto¹⁷. La molécula pierde un electrón, pasa a ser H_2^+ y esta molécula ionizada reacciona rápidamente con el H_2 existente creando H_3^+ , la molécula que desencadena la química en fase gaseosa en el medio interestelar.

Como vemos, la importancia del proceso de reciclaje del material en el cosmos también es fundamental para entender el universo molecular. Los elementos claves que desencadenan la formación de moléculas en el espacio se forman en las fases finales de las estrellas: el polvo interestelar proviene, fundamentalmente, de las estrellas gigantes rojas, final de la vida de estrellas poco masivas, mientras que los rayos cósmicos, como ya hemos visto, se producen en las explosiones de supernova.

(3) Si pensáramos intuitivamente en una reacción química, es muy probable que las primeras ideas que vinieran a la mente fueran los procesos de combustión o la imagen de un gran invento, la nevera. Pensemos, por ejemplo, en la razón por la que guardamos los alimentos en la nevera: generalmente no es para que estén más fríos, sino para que se conserven mejor. Intuitivamente sabemos que las reacciones químicas son más eficientes (tienen una mayor velocidad de reacción) a elevadas temperaturas. En el espacio las temperaturas son extremadamente bajas y, sin embargo, hallamos una química muy compleja: parece que el tipo de reacción que domina la química en el medio interestelar ha de ser diferente. Efectivamente, en los lugares del medio interestelar donde la química está dominada por reacciones en fase gaseosa son las reacciones ión-neutro las que cobran especial relevancia. Son un tipo de reacciones exóticas en nuestro planeta debido a la alta densidad de nuestro entorno. Estas reacciones tienen la particularidad de que la velocidad de reacción es inversamente proporcional a la temperatura. Este tipo de reacciones desencadenan toda la química en fase gaseosa.

(4) Los distintos estadios de la evolución de una nube molecular presentan un tipo de química diferente. Mientras que una nube densa en

¹⁷Hay que señalar que las nubes moleculares son opacas a la radiación visible y ultravioleta que emiten las estrellas. Por tanto, esta radiación no penetra en las nubes y no puede ionizar a los elementos en su interior.

fase de colapso sin indicios de formación estelar en su interior presenta un tipo de química dominada por las reacciones en fase gaseosa, donde se forman moléculas sencillas como CO, HCO^+ , CCH, y moléculas con cadenas carbonadas que pueden contener un gran número de átomos como el HC_7N , en los núcleos de nubes donde han comenzado a formarse protoestrellas encontramos una gran cantidad de moléculas orgánicas y complejas cuya presencia no se puede explicar solo con reacciones en fase gaseosa.

(5) Moléculas orgánicas complejas como metanol (CH_3OH), dimetil éter (CH_3OCH_3) o urea¹⁸ (H_2NCONH_2) son detectadas en regiones donde ha comenzado el nacimiento de estrellas (figura 11).

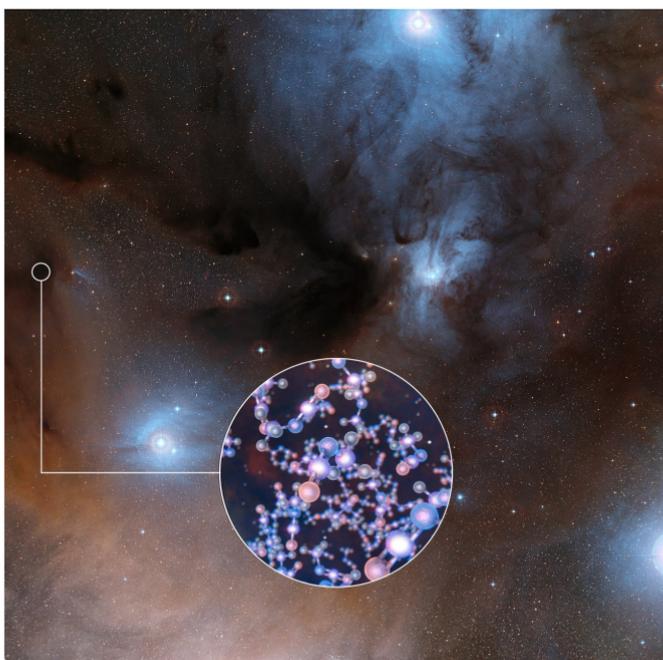


Figura 11: Recreación de la detección de metil isocianato (CH_3NCO) en una región de formación de estrellas poco masivas. Crédito: ESO/Digitized Sky Survey 2/L. Calçada.

De manera simplificada, el mecanismo de producción de estas especies es el siguiente: durante la fase de colapso de la nube para formar una

¹⁸Esta molécula ha sido descubierta este mismo año en una región de formación de estrellas masivas en el centro de nuestra galaxia conocida como Sagitario B2.

estrella, el gas se enfría lo suficiente como para que parte del contenido molecular de este gas se congele en la superficie de los granos de polvo. De manera análoga a como ocurría con el H_2 , las moléculas adheridas a la superficie de los granos tienen una cierta movilidad y pueden encontrarse creando nuevas especies. Cuando se empieza a formar la protoestrella, se producen una serie de procesos (calentamiento, expulsión de flujos de materia, discos en rotación) que transforman las condiciones físicas de los alrededores. La interacción de estos mecanismos con los granos de polvo hace que las nuevas especies creadas sean incorporadas a la fase gaseosa y podamos detectarlas.

La formación de especies moleculares en las nubes donde se forman las estrellas nos conecta directamente con el contenido molecular de las primeras fases de la evolución de un sistema planetario. Si bien la química encontrada en estas nubes moleculares es relativamente sencilla, algunas de las moléculas orgánicas halladas son prebióticas (en especial algunas moléculas nitrogenadas como la formamida, NH_2CHO , o el metil isocianato, CH_3NCO , es decir, moléculas que se constituyen como elementos esenciales para la formación de otras moléculas de gran interés biológico como, por ejemplo, los aminoácidos o las bases nucleicas).

Cometas, asteroides y meteoritos

Tratemos de conectar ahora todo este universo de moléculas complejas y prebióticas que se han formado en los lugares de nacimiento de las estrellas con nuestro propio mundo. Para intentar comprender a partir de qué compuestos pudo originarse la vida en nuestro planeta tenemos que remontarnos a los mismos orígenes del sistema solar.

Se piensa que los cometas y asteroides pueden preservar la composición química de los inicios de nuestro sistema planetario. Los cometas son objetos celestes compuestos de material rocoso y de hielo que orbitan alrededor del Sol en órbitas muy excéntricas. Su origen se encuentra en la Nube de Oort, aquellos de largo periodo, o en el Cinturón de Kuiper, los de corto periodo. Cuando los cometas se acercan al Sol, los hielos de su superficie se evaporan causando la característica coma. Observando la figura 12, es fácil reconocer que estos objetos representan los residuos de la formación de nuestra estrella. Los asteroides, por el contrario, son objetos rocosos situados en su mayoría en el Cinturón de Asteroides, entre las órbitas de Marte y Júpiter. El 75% de estos objetos son de tipo carbonáceo y presentan agua retenida en su estructura. Se piensa que los asteroides son residuos de planetesimales que no pudieron agregarse como un planeta debido a la perturbación gravitacional de Júpiter.

Por otro lado, los meteoritos, son objetos de hasta decenas de metros que alcanzan la superficie de la tierra y que se hallaban en el espacio

como producto del paso de algún cometa, de asteroides o como restos de la formación del sistema solar. Hace unos 3 800 millones de años, nuestro planeta fue bombardeado por una gran cantidad de estos objetos por lo que existe un gran debate sobre la posibilidad de que estos meteoritos trajeran las sustancias esenciales para la vida. El estudio de la composición de los meteoritos siempre ha causado grandes controversias debido a la posibilidad de que el material del que se componen pueda estar contaminado con sustancias de nuestro propio planeta y no represente la composición que tenía en el espacio.

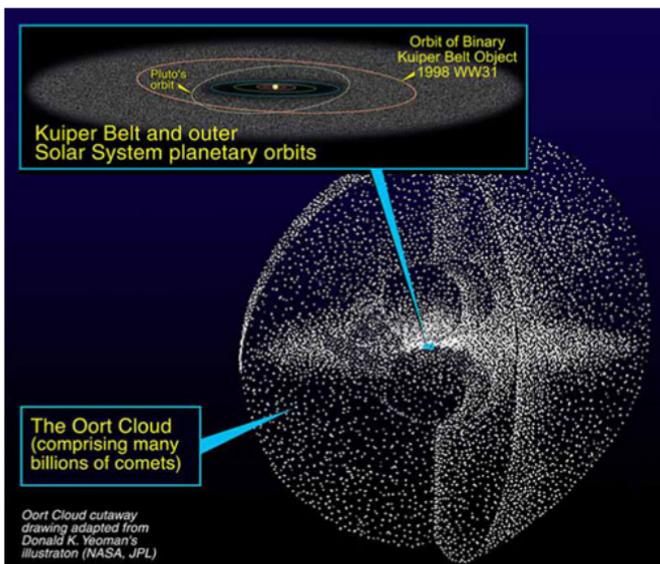


Figura 12: Imagen artística del cinturón de Kuiper y de la nube de Oort. Crédito: William Crochot, NASA/JPL/Herschel.

Se considera que los meteoritos que reflejan un tiempo más primitivo son las condritas carbonáceas. Uno de los meteoritos más estudiados de este tipo es el caído en Murchison (Australia) en 1969. Los análisis realizados desde hace más de 40 años han demostrado que el material orgánico de este meteorito contiene macromoléculas y aminoácidos. Sin embargo, no existe un consenso sobre el origen de este material entre los mismos investigadores que han pasado décadas estudiando este objeto¹⁹. En relación con los aminoácidos proteicos, unos defienden que estos

¹⁹Keith Kvenvolden, Jeffrey Bada, Michael Engel, John Cronin, Sandra Pizzarello y Stephen Macko son algunos de los agentes más representativos en este debate

compuestos son prístinos basándose en dos argumentos fundamentales: (1) los compuestos tienen composiciones isotópicas que parecen fechar su formación en ambientes presolares y (2) el extraño censo de aminoácidos encontrados: se detectan varios, pero no la totalidad, de los 22 aminoácidos proteicos presentes en los códigos genéticos de la mayoría de organismos que habitan la Tierra y más de 50 aminoácidos que son desconocidos o se encuentran de manera limitada en la biosfera. Sin embargo, como hemos dicho, otra parte de los investigadores insiste en que estas pruebas son solo, podríamos decir si lo llevamos al terreno jurídico, circunstanciales y defienden que es difícil poder asegurar que los compuestos sean extraterrestres una vez que el meteorito ha cruzado la biosfera terrestre y ha sido manipulado para la experimentación.

Más controvertido todavía fue el anuncio de la NASA de una vida pasada en Marte por las señales encontradas en 1996 por McKay y colaboradores en el meteorito marciano ALH84001. Una microfotografía del meteorito que mostraba estructuras parecidas a bacterias fósiles era uno (no el único) de los argumentos a favor de este hallazgo (figura 13). La misma web de la NASA publica un resumen donde las hipótesis de este estudio son explicadas y discutidas (o más bien, refutadas)²⁰.

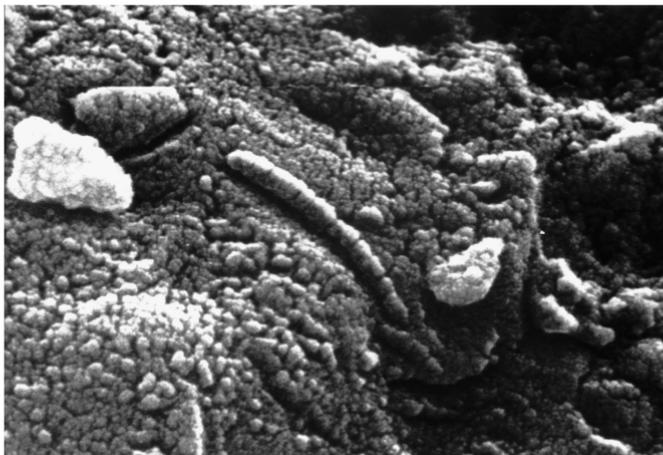


Figura 13: Una estructura alargada que se asemeja a un microorganismo fósil revelada en una microfotografía de una muestra del meteorito marciano ALH84001. Crédito: Encyclopedia Britannica/NASA.

En la misma línea, R. Hoover publicó un artículo en 2011 en el *Journal of Cosmology* donde se muestran imágenes obtenidas con

²⁰<https://planetaryprotection.nasa.gov/summary/alh84001>

un microscopio de electrones tipo FESEM de los interiores de varios meteoritos carbonáceos. El estudio revela estructuras parecidas a las de la figura 13 en muchos de ellos y se defiende que se trata de cianobacterias fosilizadas. Dada la controvertida naturaleza de este resultado, la revista invitó a realizar la revisión del artículo a 100 expertos. Veintiséis comentarios sobre el artículo están publicados en esa misma revista.

Huyendo de estas controversias, volvamos, pues, a los cometas y asteroides, como objetos que preservan las condiciones más primitivas del sistema solar. Las misiones espaciales Rosetta y OSIRIS-REx son la prueba del gran interés por dar respuesta a los orígenes de la formación de nuestro planeta y de sus constituyentes.



Figura 14: Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko y representaciones de Rosetta y Philae. Crédito: Nave, ESA-J. Huart, 2014; Cometa: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA.

La misión Rosetta de la Agencia Espacial Europea concluyó el 30 de septiembre de 2016 tras dos años orbitando el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. Rosetta, además, envió un módulo de aterrizaje, Philae, a la superficie del cometa (figura 14). Esto permitió el análisis *in situ* de su composición. Mediante espectroscopía de masas se identificaron 16 especies, muchas de ellas compuestos prebióticos como cianuro de hidrógeno (HCN), glicolaldehído (CH_2OHCHO), formamida (NH_2CHO) o metil isocianato (CH_3NCO). Resulta muy significativo que las 16 especies identificadas hayan sido también detectadas en las regiones de formación de estrellas, las nubes del medio interestelar de las que hablábamos más

arriba, en regiones donde se produce la evaporación de los mantos de hielo del polvo interestelar. Sin duda este resultado refuerza la teoría de que los cometas mantienen la composición de los inicios de formación del sistema solar.

Otro de los grandes resultados de la misión Rosetta fue la determinación de la relación isotópica del deuterio frente al hidrógeno en el agua del cometa. Comparando estos resultados con la relación que se observa en los océanos de la Tierra, se puede determinar si una proporción significativa de cometas pudo contribuir a depositar el agua en nuestro planeta. En la figura 15 se muestran los resultados de la misión junto con esta misma relación isotópica en otros objetos del sistema solar. La discrepancia entre el valor del cometa y el de la Tierra alimenta el debate sobre el origen de los océanos de la Tierra y si son los asteroides o los cometas los que jugaron el principal papel en el suministro de agua de nuestro planeta.

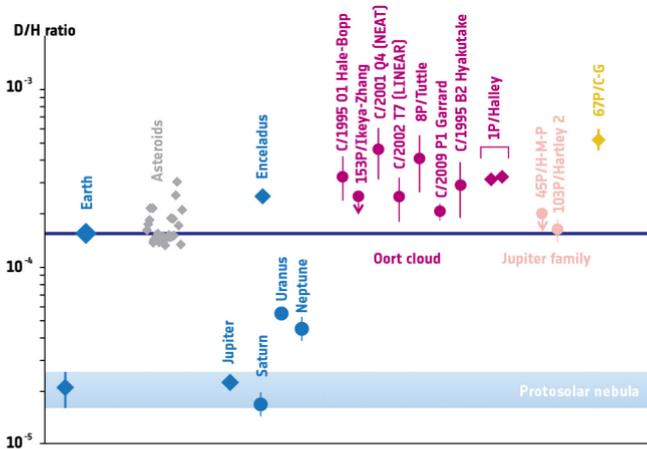


Figura 15: Diferentes valores de la relación de deuterio/hidrógeno observados en el agua de varios cuerpos en el sistema solar. Los puntos de datos están agrupados por color: planetas y lunas (azul), meteoritos condriticos del Cinturón de Asteroides (gris), cometas que se originan en la nube de Oort (magenta) y cometas de la familia de Júpiter (rosa). El dato de Rosetta está resaltado en amarillo. Los diamantes representan datos obtenidos *in situ*; los círculos representan datos obtenidos por métodos astronómicos. Crédito: Altwegg et al. 2014 / ESA.

Siguiendo la misma línea de discusión, un estudio publicado este mismo año defiende el papel predominante de los asteroides y sugiere que los

meteoritos de condritas carbonáceas fueron los que trajeron gran parte del agua de nuestro planeta. El estudio se basa en la observación de la acumulación de hielos y minerales hidratados en las partes externas de los discos protoplanetarios, en una región distante donde en el sistema solar primitivo se formaron los asteroides progenitores de esta clase de meteoritos.

Quizás la balanza lleve un tiempo decantándose por asignar un papel más relevante a los asteroides. La misión actual de la NASA OSIRIS-REx trata de desvelar estas incógnitas. El 3 de diciembre de 2018, la nave llegó a 19 kilómetros del asteroide Bennu. Los datos analizados de la misión han revelado minerales hidratados en las arcillas de este objeto, lo que sugiere que en algún momento el asteroide interactuó con el agua. La misión planea recoger muestras de la superficie de este asteroide con el fin de determinar el contenido orgánico de este objeto. Además, Bennu es uno de los asteroides potencialmente peligrosos para la Tierra en el próximo siglo y la misión también contempla el estudio del mismo para poder llevar a cabo, llegado el caso, una misión futura destinada a mitigar un (de momento hipotético) impacto.

Conclusión

Para entender nuestros orígenes cósmicos nos hemos remontado hasta el Big Bang. Todo el hidrógeno del universo y la mayoría del helio fue formado en la nucleosíntesis primordial. Las estrellas se dedican a consumir este combustible a la vez que crean nuevos elementos químicos. Siguiendo la ordenación de la tabla periódica y teniendo en cuenta las abundancias observadas en el sistema solar, el origen de los elementos hasta aquellos del pico del hierro se explica de manera satisfactoria teniendo en cuenta los procesos de fusión nuclear de los interiores estelares y aquellos eventos explosivos que se dan en las últimas fases de la vida de las estrellas, las explosiones de supernovas. Los procesos nucleares de captura de neutrones (s y r) son los que forman elementos más pesados. El proceso s ocurre en las fases finales de la vida de estrellas parecidas a nuestro Sol. Sin embargo, no ha sido hasta hace pocos años, gracias a la detección de las ondas gravitacionales, cuando se ha podido determinar que la mayoría de los elementos químicos que se forman mediante el proceso r , lo hacen a partir de las explosiones de kilonovas, cuando se fusionan dos estrellas de neutrones.

Con el fin de indagar el origen de la complejidad química y biológica de nuestro planeta, nos hemos adentrado en el estudio del universo molecular. Las moléculas halladas en cometas y en regiones ricas en gas y polvo donde se forman estrellas, demuestran que la química de las primeras fases de la formación de un sistema planetario es muy compleja. Bajo

las condiciones aparentemente hostiles del espacio exterior se pueden producir moléculas orgánicas y prebióticas precursoras de moléculas de gran interés biológico como los aminoácidos. Parece probable que las moléculas que son la base de nuestra vida en la Tierra se formaran durante las primeras etapas de la formación del sistema solar. Sin embargo, aún no hay respuestas para muchas preguntas: por ejemplo, el origen de los elementos esenciales que desencadenaron la vida en la Tierra sigue siendo incierto. Es más, tras décadas de investigaciones aún existen preguntas, ya no difíciles de responder, sino casi imposibles de formular: ¿cuál es el punto de inflexión que nos lleva del universo molecular al universo biológico? Nuestra condición es seguir ahondando en futuras preguntas.

Bibliografía

- Agúndez, M. (2009). Estudio de la Química en la Envoltura Circunestelar IRC+10216. Tesis Universidad Autónoma de Madrid. Capítulo 1.
- Alcolea, J. (2019). Novas, kilonovas, supernovas e hipernovas y otros monstruos que conviene observar desde muy muy lejos. Ponencia, *COIIM: Fronteras de la Astrofísica*.
- Belloche, A. et al. (2019). Urea, $\text{H}_2\text{NC}(\text{O})\text{NH}_2$, in the Interstellar Medium. *Astronomy and Astrophysics*, 628, A10.
- Bowman, J. D. et al. (2018). An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum, *Nature*, 555, 67.
- Goesmann, F. et al. (2015). Organic compounds on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry, *Science*, 349, 6247.
- Goicoechea, J. R. y J. Cernicharo. (2011). Química del universo. *Revista de Occidente*, 361, 7.
- Hashimoto, T. et al. (2018). The onset of star formation 250 million years after the Big Bang, *Nature*, 557, 392.
- Hoover, R. B. (2011). Fossils of Cyanobacteria in C11 Carbonaceous Meteorites, *Journal of Cosmology*, 13.
- Johnson, J. A. (2019). Populating the periodic table: Nucleosynthesis of the elements, *Science*, 363, 6426, 474.
- McKay, D. S. et al. (1996). Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH 84001, *Science*, 273, 924.

- Meierhenrich, U. (2015). *Comets and their Origin*, Wiley-VCH.
- Reber, G. (1944). Cosmic Static, *Astrophysical Journal*, 100, 279.
- Shaw, A. M. (2006). *Astrochemistry, from Astronomy to Astrobiology*, John Wiley & Sons Ltd.
- Trigo-Rodríguez, J. M. et al. (2019). Accretion of Water in Carbonaceous Chondrites: Current Evidence and Implications for the Delivery of Water to Early Earth, *Space Science Reviews*, 215, 1.

Recursos en internet

- Astrobiology Magazine (2003, 12 February). Rosenthal, A. M. Murchison's amino acids: tainted evidence?
<https://www.astrobio.net/meteoritescomets-and-asteroids/murchisons-amino-acids-tainted-evidence/>
- Eddington Lectures (2019, 7 March). Karakas, A. Heavy elements in red giant stars.
https://www.ast.cam.ac.uk/sites/default/files/talk_archive/AmandaKarakas_07mar2019.pdf
- NASA, Planetary Protection Office (2003). Treiman, A. H. Traces of Ancient Martian Life in Meteorite ALH84001: An Outline of Status in late 2003.
<https://planetaryprotection.nasa.gov/summary/alh84001>
- National Geographic España (3 agosto 2018). Jara, E. Encuentran evidencias de estrellas formándose tan solo 250 millones de años después del Big Bang.
https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/encuentran-evidencias-estrellas-formandose-tan-solo-250-millones-anos-despues-big-bang_12727/1
- Nature News, (2018, 28 February). Gibney, E. Astronomers detect light from the Universe's first stars.
<https://www.nature.com/articles/d41586-018-02616-8>
- Observatori Astronòmic, Universitat de València. (1 febrero 2018). Ortiz, A. Los fullerenos interestelares pueden ayudar a encontrar soluciones para problemas en la Tierra.
<https://observatori.uv.es/los-fullerenos-interestelares-pueden-ayudar-a-encontrar-soluciones-para-problemas-en-la-tierra/>

OSIRIS-REx, NASA.

<https://www.asteroidmission.org/objectives/>

Rosetta, ESA.

https://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta

Science Alert, (2017, 23 January). Crew, B. This Awesome Periodic Table Shows The Origins of Every Atom in Your Body.

<https://www.sciencealert.com/this-awesome-periodic-table-shows-the-origins-of-every-atom-in-your-body>

Tancredi, G. (24 febrero 2014). El origen de los elementos químicos.

<https://es.slideshare.net/FHEDRA/el-origen-de-los-elementos-quimicos-31601679>

USRA, Lunar and Planetary Institute. Treiman, A. H. Earlier Scientific Papers on ALH 84001 Explained, with Insightful and Totally Objective Commentaries.

https://www.lpi.usra.edu/lpi/meteorites/alhnpapers_archive.html