

La química del Universo y el origen de la vida

EL ESTUDIO DE LOS PROCESOS QUÍMICOS QUE TIENEN LUGAR EN EL UNIVERSO APORTA INFORMACIÓN ESENCIAL PARA AVERIGUAR CÓMO SURGIÓ LA VIDA EN LA TIERRA

Por Jesús Martín Pintado (DMIR-IEM-CSIC)

ENTENDER EL ORIGEN DE LA VIDA ES UNO DE LOS GRANDES RETOS que tenemos ante nosotros. Una de las preguntas clave es si la vida ha aparecido solo en la Tierra como resultado de unas condiciones favorables o es un hecho consustancial a las leyes físicas que rigen nuestro Universo. En la actualidad no tenemos la respuesta, e incluso aún hoy no conocemos cómo surgió la vida en la Tierra. En este artículo nos adentraremos en los secretos, muchos de ellos todavía muy bien guardados, de la evolución química del Universo que muestra cómo las moléculas fundamentales para la vida se pueden formar en las nubes moleculares interestelares.



Imagen de la emisión en rayos X de la supernova Cassiopea A. Esta imagen muestra el gas caliente expulsado por la explosión de una estrella masiva.

Factorías de elementos pesados y de polvo interestelar

Todo comenzó hace unos 14.000 millones de años, con la gran explosión que dio origen al Universo con las leyes físicas que lo rigen. Cuando el Universo tenía unos 300.000 años y unos 4.000 grados de temperatura se produjo un hecho importantísimo para la química: los núcleos de hidrógeno, helio, litio y berilio capturaron los electrones y dieron lugar a los primeros átomos.

En esta época el Universo era químicamente demasiado pobre como para que se pudieran formar moléculas complejas relacionadas con la vida. Sin embargo, a medida que el Universo siguió expandiéndose y enfriándose tuvo lugar un fenómeno extraordinario y fundamental para la aparición de la vida: la formación de la primera generación de estrellas. En el interior de estas estrellas se generaron, por primera vez, los elementos químicos relevantes para la vida, tales como el carbono, el oxígeno, el nitrógeno y otros elementos minoritarios fundamentales para la formación de los planetas sólidos. En tan sólo diez millones de años estas

estrellas explotaron, como las supernovas que observamos hoy en día, expulsando ingentes cantidades de elementos pesados al medio circundante.

Se piensa que en la muerte de estas estrellas se produjo otro hecho fundamental, la formación de los primeros granos de polvo. Al expandirse las capas eyectadas, estas se enfriaron formando en su interior unos minúsculos granos de polvo compuestos fundamentalmente por grafito y silicatos. Los procesos que condujeron a la formación de los granos de polvo en la materia eyectada en las explosiones de supernova son, por el momento, desconocidos. Los granos de polvo, extraordinariamente pequeños, menores que una milésima parte de un milímetro, son los grandes almacenes de material orgánico. Se estima que contienen el 20% del oxígeno, el 50% del carbono y prácticamente todo el silicio y el hierro de la materia interestelar.

El nacimiento de la química en las nubes moleculares

Los minúsculos granos de polvo, los átomos de carbono, el oxígeno y el nitrógeno generados en las primeras estrellas se incorporan a la materia interestelar, cambiando radicalmente la composición química de las aglomeraciones de gas donde tiene lugar la formación de la nueva generación de estrellas y planetas. Los pequeños granos de polvo absorben la radiación ultravioleta de las estrellas de manera que esta no penetra en las partes más internas de las nubes de gas y polvo. Así, estas aglomeraciones de gas aparecen como zonas oscuras en las que no se observan estrellas debido a que los granos de polvo absorben la radiación e impiden su observación en el dominio óptico.



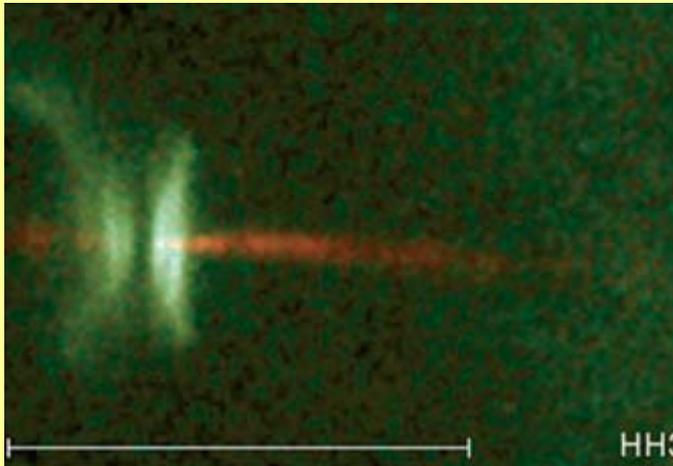
Radiotelescopio de 30 metros de diámetro del Instituto de Radioastronomía Milimétrica situado en la Loma de Dílar en Pico Veleta (Granada). Con este radiotelescopio se ha contribuido de manera fundamental a establecer la complejidad química del Universo

Solo se puede penetrar en el interior de las zonas más oscurecidas de estas nubes escudriñándolas en emisión de microondas con grandes radiotelescopios. Los trabajos pioneros en radioastronomía en 1968 detectaron, de manera inesperada, las primeras moléculas triatómicas del espacio interestelar. Moléculas como el amoníaco, el formaldehído y, sobre todo, el vapor de agua, son de hecho de gran relevancia en la química prebiótica. La detección de estas moléculas supuso un gran cambio en nuestra idea sobre la complejidad química en el Universo y un reto para establecer los procesos químicos que tienen lugar en el espacio interestelar.

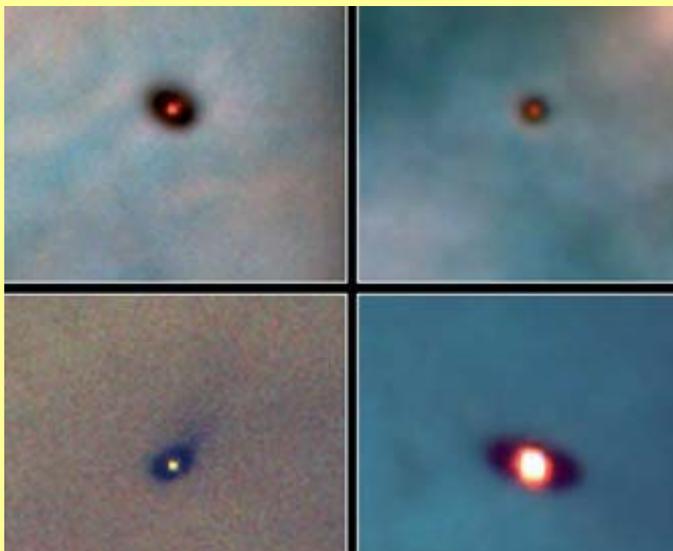
En los laboratorios terrestres las reacciones químicas más importantes se producen debido a las colisiones entre tres cuerpos. Esto es posibles gracias a que las densidades alcanzan el trillón de partículas por centímetro cúbico, muchísimo

mayores que las existentes en el medio interestelar, que son del orden de diez mil partículas por centímetro cúbico. La gran pregunta es: ¿qué mecanismo produce

Imagen de una estrella de tipo solar en formación. Muestra la presencia del disco protoplanetario (zona oscurada horizontal situada entre las dos nebulas brillantes) y de los chorros de gas supersónicos (en verde) que se eyectan en la dirección perpendicular al disco. Fuente: NASA.



Discos (zonas oscuras) observados en la nebulosa de Orión. Los discos alrededor de las protoestrellas de baja masa tienen la misma composición química que la materia interestelar de la que se formó la estrella. Fuente: NASA.



metano y monóxido de carbono. Así lo demuestran los espectros observados por el satélite infrarrojo Infrared Space Observatory de la Agencia Espacial Europea en la dirección de estrellas recién formadas.

En este estadio de evolución la complejidad química de las nubes moleculares era ya extraordinaria. Existían moléculas de más de tres átomos, granos de polvo y mantos de hielos tremendamente ricos en compuestos moleculares. Los radiotelescopios han detectado que una complejidad química similar a la hasta ahora descrita podría existir cuando el Universo tenía tan solo unos mil millones de años.

una química interestelar tan rica en las inmensas y frías nubes oscuras -con temperaturas de unos 260 grados bajo cero- y prácticamente en el vacío en regiones protegidas de la radiación ultravioleta?

La aparición de los hielos en el Universo

El polvo no solo apantalla el interior de las nubes oscuras de la radiación ultravioleta, tan dañina para las moléculas, sino que, a tan bajas temperaturas, los granos de polvo son pegajosos y pueden actuar como catalizadores de reacciones químicas. Todo átomo que choque con un grano de polvo se queda adherido a él. En las condiciones típicas de una nube interestelar, a cada grano de polvo se le pueden pegar unas cien moléculas en tan solo unos diez mil años. Estos átomos pueden moverse sobre la superficie de los granos y encontrarse con otros átomos, fundamentalmente de hidrógeno, para formar la molécula más abundante del Universo, el hidrógeno molecular; además, gracias a la hidrogenación del carbono, del oxígeno y del nitrógeno, se generan también otras moléculas simples como el CH₄ (metano), el NH₃ (amoníaco) y el H₂O (agua). Estas moléculas recubren el grano de un manto de hielo de agua, amoníaco,

La aparición de alcoholes en el Universo

Otro paso de gran importancia para la evolución hacia un incremento de la complejidad química es la formación y evolución de nuevas estrellas en el seno de estas nubes con una gran riqueza química.

Las estrellas de gran masa, como las que se observan en Orión, emiten mucha radiación ultravioleta que altera drásticamente la composición química del gas que las rodea. En el entorno más cercano a la estrella, la radiación ultravioleta fotodisocia las moléculas, ioniza los átomos, evapora los mantos helados de los granos de polvo e incluso destruye parcialmente el núcleo de los granos. Sin embargo, en las zonas de las nubes un poco más alejadas de la estrella, donde penetra solo una parte de la radiación ultravioleta, los mantos helados están también sometidos a ciertas dosis de radiación ultravioleta. Esta radiación disocia las moléculas de los hielos de agua, amoníaco y metano y propicia la formación sobre los granos de moléculas orgánicas

mucho más complejas. Este estado de evolución del Universo fue de gran importancia, ya que se pudieron formar los alcoholes, no sólo el más simple, el alcohol metílico, sino también más complejos como el alcohol etílico.

Actualmente se han identificado más de 130 moléculas, algunas de ellas con más de trece átomos. De ellas cabe destacar el amoníaco, el agua, el ácido cianhídrico, el formaldehído y el cianoacetileno.

Nacimiento de las estrellas de tipo solar y sus planetas

En el seno de estas nubes moleculares tiene lugar el colapso de la materia para formar las estrellas de tipo solar. La formación de una estrella no es el resultado de un proceso simple, sino que viene acompañada de la presencia de un disco de acrecimiento en rotación y de un flujo bipolar que expulsa materia. Dentro de los discos que giran alrededor de las protoestrellas se forman grandes conglomerados, de aproximadamente un kilómetro de tamaño, de material rocoso en su parte interna y de hielos, granos de polvo y gas en la parte externa, conocidos como planetesimales.

Objetos similares a estos conglomerados se pueden observar ahora en el Sistema Solar. Concretamente, los asteroides podrían considerarse como planetesimales rocosos y los cometas como planetesimales helados. Los estudios de los cometas muestran que las moléculas que se evaporan de sus núcleos tienen abundancias muy similares a las encontradas en el medio interestelar, e incluso en algún cometa se han detectado moléculas complejas orgánicas como el metanol.



Imagen de la galaxia M51 tomada con el telescopio espacial de la NASA. Los filamentos oscuros que se encuentran en los brazos espirales corresponden a grandes concentraciones de gas molecular y polvo en los que tienen lugar la formación de las nuevas estrellas.

Elementos caídos del cielo y síntesis prebiótica

Como sugirió Juan Oro en el año 1961, los impactos de grandes planetesimales en las primeras etapas de formación de la Tierra pudieron actuar en ocasiones como agentes destructores de la vida, pero también aportaron grandes cantidades de elementos esenciales para ella. De hecho, la química prebiótica parece sustentarse en un pequeño número de moléculas precursoras. El histórico experimento de Miller- Urey demostró la capacidad de generar aminoácidos a partir de una atmósfera reductora con moléculas simples como metano y amoníaco sometidas a descargas eléctricas.

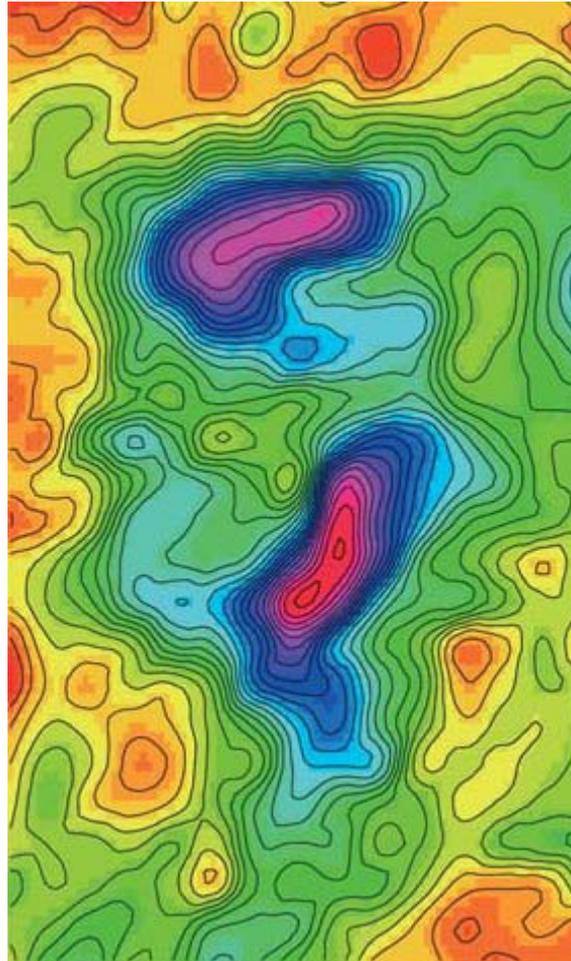
Los experimentos de Juan Oro también muestran que una sopa prebiótica, que contenga ácido cianhídrico y amoníaco disueltos en agua, da lugar a los aminoácidos (elementos esenciales de las proteínas) y, más importante aún, a la adenina. Esta molécula juega un papel central en la vida ya que es una de las cuatro bases nitrogenadas del ácido desoxirribonucleico (ADN) y del ácido ribonucleico (ARN) y es un componente de la adenosina trifosfato, la molécula que provee de energía a las células. Asimismo, en experimentos más recientes se han llegado a formar además las otras tres bases del ADN: guanina, timina y citosina.

Estos experimentos demuestran que los compuestos necesarios para iniciar la química prebiótica se generan en grandes cantidades en el medio interestelar y que es muy factible que fueran suministrados a la Tierra por los cometas y asteroides durante los quinientos millones de años de intenso bombardeo que siguió a la formación del Sistema Solar. Estos compuestos se disolvieron en los océanos dando lugar a la sopa prebiótica.

Los meteoritos y la complejidad química prebiótica en el espacio

Hemos visto que las nubes moleculares son inmensos laboratorios que generan los compuestos moleculares básicos que, disueltos en agua, pueden dar lugar a las moléculas esenciales de la vida: los aminoácidos y las bases nitrogenadas. Afortunadamente, la constante aportación de material orgánico desde el espacio nos permite profundizar aún más en la composición química de la materia interestelar y de la materia del Sistema Solar. En la actualidad caen a la Tierra varios cientos de toneladas de material extraterrestre, la mayoría en forma de pequeñas partículas de polvo y de meteoritos. Estos meteoritos de tamaños intermedios permiten analizar con detalle la composición química orgánica de la materia extraterrestre.

Los meteoritos como el Murchison, el Orgueil y el Allende muestran una gran riqueza de compuestos químicos formados en condiciones abióticas. Concretamente, en el meteorito Murchison se han identificado un gran número de



Distribución del alcohol etílico en una nube molecular gigante situada en el núcleo central de la Vía Láctea.
Fuente: Jesús Martín-Pintado (DMIR-IEM-CSIC).

compuestos orgánicos, entre los que cabe destacar al menos 79 aminoácidos, ocho de ellos correspondientes a los veinte de los que se compone la vida en la Tierra. Además, se han detectado dos de las bases nitrogenadas de los ácidos nucleicos; la adenina y la guanina. Más importante aún es la identificación de ácidos grasos que no aparecen de manera simple en la química prebiótica realizada en laboratorios terrestres. En condiciones alcalinas, estos ácidos grasos pueden crear las membranas de las primeras células rudimentarias.



Conceptión artística del interferómetro que operará a longitudes de onda milimétricas y submilimétricas *Atacama Large Millimeter Array*. Se prevé que este instrumento, que Europa y Estados Unidos construyen en colaboración, esté operativo en el año 2012.

A la vista de nuestros conocimientos actuales sobre la complejidad química del medio interestelar es muy posible que no solo los compuestos básicos como el agua, el amoníaco, el ácido cianhídrico y el cianoacetileno, sino también los aminoácidos, las bases nitrogenadas y los ácidos grasos que constituyen las proteínas, los ácidos nucleicos y las membranas de las protocélulas, podrían haber sido suministrados por el polvo interestelar, los meteoritos y los cometas.

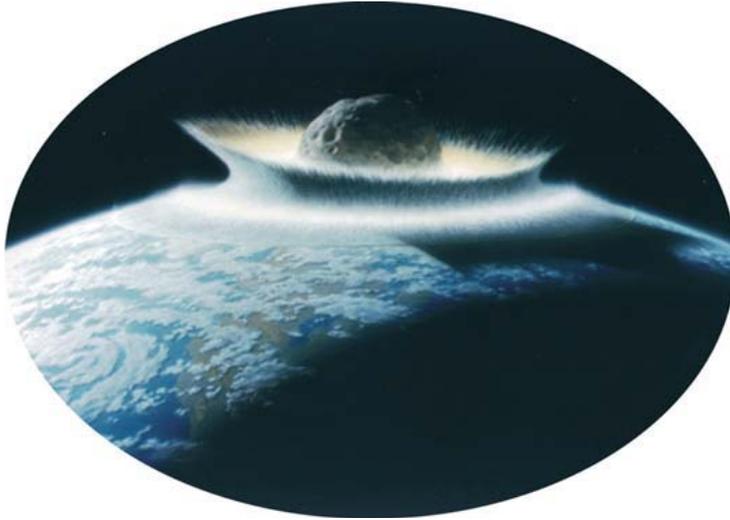
Se sabe que las primeras evidencias de vida en la Tierra datan de hace unos 3.800 millones de años, en la época en la que la Tierra aún estaba siendo bombardeada con gran intensidad. Todo parece indicar que la vida arraigó con rapidez en la Tierra e incluso es posible que apareciera antes, pero que no prosperara debido a las inhóspitas condiciones. Esto podría indicar que los cometas, los asteroides y el polvo interplanetario pudieron suministrar compuestos ya muy complejos que dieron lugar a un rápido desarrollo de la vida debido a la presencia de agua líquida.

Perspectivas futuras

Algunos de los pasos fundamentales que hemos esbozado hasta ahora son simplemente hipótesis. Pero en los próximos años, el estudio de la aparición y evolución de la vida centrará el desarrollo de nueva instrumentación y de misiones espaciales. Así, por ejemplo, la posibilidad de vida en Marte se abarcará en profundidad gracias a los programas de exploración de este planeta planeados por la Agencia Espacial Europea (ESA) y por la NASA.

Asimismo, el telescopio espacial Herschel de la ESA abrirá por primera vez la ventana del infrarrojo lejano y permitirá estudiar la abundancia del agua en el Universo. La construcción, entre Europa, Norteamérica y Japón, del interferómetro a longitudes de onda milimétricas y submilimétricas Atacama Large Millimeter Array (ALMA) nos permitirá hacer un censo mucho más completo de las moléculas existentes en el medio interestelar y comprender mejor los procesos que dieron lugar a la formación y evolución de los planetas y la complejidad química necesaria para entender la aparición de la vida.

Además, el siglo que acaba de empezar será, sin lugar a dudas, muy productivo en



Choque de un meteorito de gran tamaño cuando ya se habían formado los océanos en la Tierra. La aportación de material orgánico extraterrestre a la sopa prebiótica pudo jugar un papel fundamental en la aparición de vida en la Tierra.

la investigación de las ciencias de la vida. Con toda seguridad, en los próximos años se desarrollarán proyectos interdisciplinarios que incluyan a astrónomos, biólogos, químicos y geólogos y que traerán consigo descubrimientos fundamentales para el avance de nuestro conocimiento del origen de la vida.

Este artículo aparece en el nº 25, de junio 2008, de la revista *Información y Actualidad Astronómica*, del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC).