

DETECCIÓN DE ETANOLAMINA, UN PRECURSOR

La Tierra se formó aproximadamente al mismo tiempo que el Sol hace unos 4500 millones de años a partir de una enorme nube de gas y polvo interestelar. Como el resto del universo, dicha nube estaba constituida principalmente por hidrógeno molecular (H_2) y helio (He), pero albergaba también trazas de otras muchas moléculas. Este contenido químico fue la materia prima a partir de la cual se formaron los distintos cuerpos celestes de nuestro Sistema Solar. En el periodo comprendido entre los 400 y 700 millones años posteriores a su formación, la joven Tierra experimentó un continuo bombardeo de cuerpos extraterrestres (asteroides y cometas), conocido como el *bombardeo intenso tardío* (del inglés “*the Late Heavy Bombardment*”).



Víctor Manuel Rivilla
victor.rivilla@cab.inta-csic.es

Izaskun Jiménez-Serra
ijimenez@cab.inta-csic.es

Centro de Astrobiología, CSIC-INTA

Numerosas evidencias indican que estos objetos pudieron transportar una gran cantidad de moléculas a la superficie del planeta, incluyendo el agua de nuestros océanos (H_2O) y moléculas orgánicas de mayor complejidad. En efecto, es bien conocido que meteoritos como el de Murchison o el de Orgeil contienen más de 80 aminoácidos, siendo la mayoría de ellos de origen no biológico. Este maná químico pudo jugar un papel crucial en la aparición de la vida en la Tierra, que se estima que ocurrió hace unos 3800 millones de años. Por este motivo, el estudio de la complejidad química en las nubes moleculares del medio interestelar nos permite conocer qué moléculas pudieron haber llegado a la superficie de nuestro planeta, contribuyendo al cóctel químico prebiótico que precedió –y posiblemente permitió– el nacimiento de las primeras formas de vida.

Uno de los hitos cruciales en el origen de la vida fue la aparición de las membranas celulares. Estas estructuras se encargan de mantener unas condiciones estables en el interior de las células, protegiendo tanto su material genético como su maquinaria metabólica. Aunque existe un gran debate en torno al origen de las membranas celulares, la hipótesis más aceptada es que las primeras membranas pudieron estar formadas por ácidos o alcoholes grasos relativamente simples. Esto es debido a que estas moléculas presentan una gran capacidad hidrofóbica cuando entran en contacto con el agua. En la actualidad, sin embargo, las membranas celulares de todos los seres vivos están hechas de moléculas mucho más complejas, los fosfolípidos. Por tanto, en algún momento de la evolución temprana de las membranas celulares tuvo que producirse una transición de ácidos/alcoholes grasos simples a fosfolípidos. Y en este punto es donde la contribución interestelar pudo jugar un papel clave.

Uno de los fosfolípidos más simples que existen en la naturaleza, y el segundo más abundante en los seres vivos, es la fosfatidiletanolamina (Figura 1). Esta molécula está compuesta por dos colas hidrofóbicas y una cabeza hidrofílica, formada por un glicerol, un grupo fosfato y una molécula orgánica con nitrógeno llamada etanolamina: $NH_2CH_2CH_2OH$ (Figura 1). Esta molécula, de 11 átomos, contiene cuatro de los seis elementos químicos fundamentales para la vida

DE FOSFOLÍPIDOS EN EL MEDIO INTERESTELAR

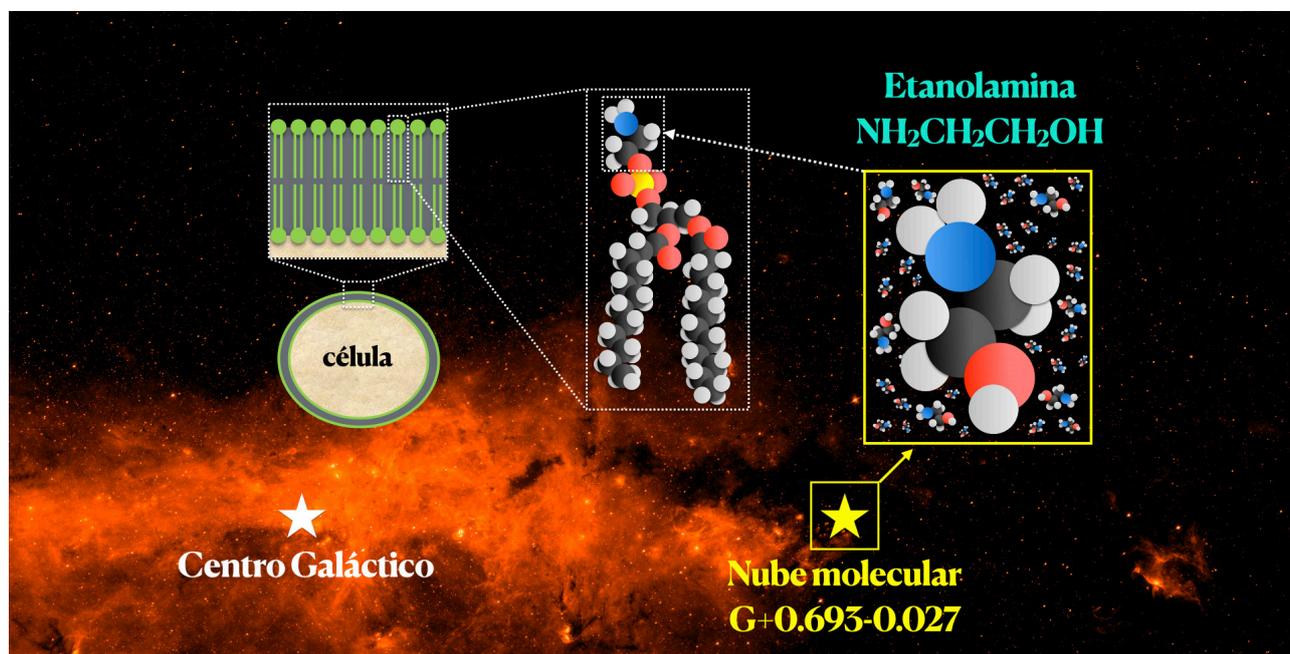


Figura 1: Descubrimiento de etanolamina ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) en la nube molecular G+0.693-0.027 situada en el centro de nuestra Galaxia. Esta molécula forma parte de la cabeza de los fosfolípidos, los ladrillos de las membranas celulares. Créditos: V.M. Rivilla/ cámara IRAC4 (observando a 8 micras) a bordo del Telescopio Espacial Spitzer (NASA).

(CHONPS), y además de ser un constituyente de los fosfolípidos, puede actuar como precursora del aminoácido más simple, la glicina ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$). Por todo ello, la etanolamina es una especie molecular que pudo desempeñar un rol fundamental en la química prebiótica de la Tierra primitiva.

Esta molécula se identificó en restos del meteorito Almahatta Sitta, que cayó en el desierto de Nubia (Sudán) en 2008. Sin embargo, el análisis realizado no pudo discernir el origen de la etanolamina en este meteorito. Una de las posibilidades es que se formara a partir de precursores moleculares más sencillos en el medio interestelar, incorporándose posteriormente al asteroide parental durante su proceso de formación. Si esto fuera cierto, entonces la etanolamina debería estar presente en el gas del medio interestelar. Por este motivo, un equipo científico multidisciplinar de astrofísicos, astroquímicos y bioquímicos del [Centro de Astrobiología \(CAB\)](#) nos planteamos el desafío de detectar esta molécula por primera vez en el espacio.

LA BÚSQUEDA DE ETANOLAMINA EN EL MEDIO INTERESTELAR

Para detectar moléculas en nubes moleculares interestelares se utilizan observaciones con radiotelescopios que operan en los rangos de longitudes de onda centimétricas, milimétricas y submilimétricas. Las moléculas de una parcela de gas en el medio interestelar que se encuentra a una cierta temperatura rotan y vibran en función de dicha temperatura y, al hacerlo, emiten luz. Dado que los niveles de energía de la molécula están *cuantizados*, y que cada transición entre niveles produce fotones a una determinada frecuencia, cada molécula emite un espectro de emisión característico y unívoco. Para confirmar la presencia de una molécula en el espacio se requiere la detección de varias de estas transiciones, de manera que se descarten falsos positivos o que la señal observada se deba a luz emitida por otras moléculas.

Para abordar la detección de la etanolamina, nuestro equipo utilizó dos potentes radiotelescopios situados ambos en suelo español. Por un lado, el radiote-

lescopia de 40 metros de diámetro del [Observatorio de Yebes](#), en Guadalajara, y por otro, el [radiotelescopio IRAM de 30 metros](#) de diámetro que se encuentra en el Pico Veleta (Sierra Nevada), en Granada (Figura 2). Con estos telescopios observamos una nube molecular situada en el centro de nuestra galaxia llamada G+0.693-0.027. Esta nube es un laboratorio ideal para descubrir nuevas moléculas en el espacio, puesto que es una de las fuentes astronómicas conocidas que presenta mayor riqueza química. Hasta la fecha, más de 120 especies moleculares distintas se han detectado en G+0.693-0.027.

Gracias a estas observaciones hemos obtenido un barrido espectral sin precedentes de esta nube molecular, que cubre varias decenas de gigaherzios a longitudes de onda entre 1 y 7 milímetros. Esto nos ha permitido buscar múltiples transiciones rotacionales de etanolamina, lo cual era un requisito indispensable para la identificación clara y definitiva de la molécula. Moléculas complejas como la etanolamina ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) emiten transiciones muy débiles con intensidades típicas de unos pocos milikelvin en escala de temperatura de antena. Por tanto, es necesario que las observaciones realizadas con radiotelescopios sean muy profundas. Tras decenas de horas de observación usando ambos telescopios, conseguimos alcanzar una sensibilidad

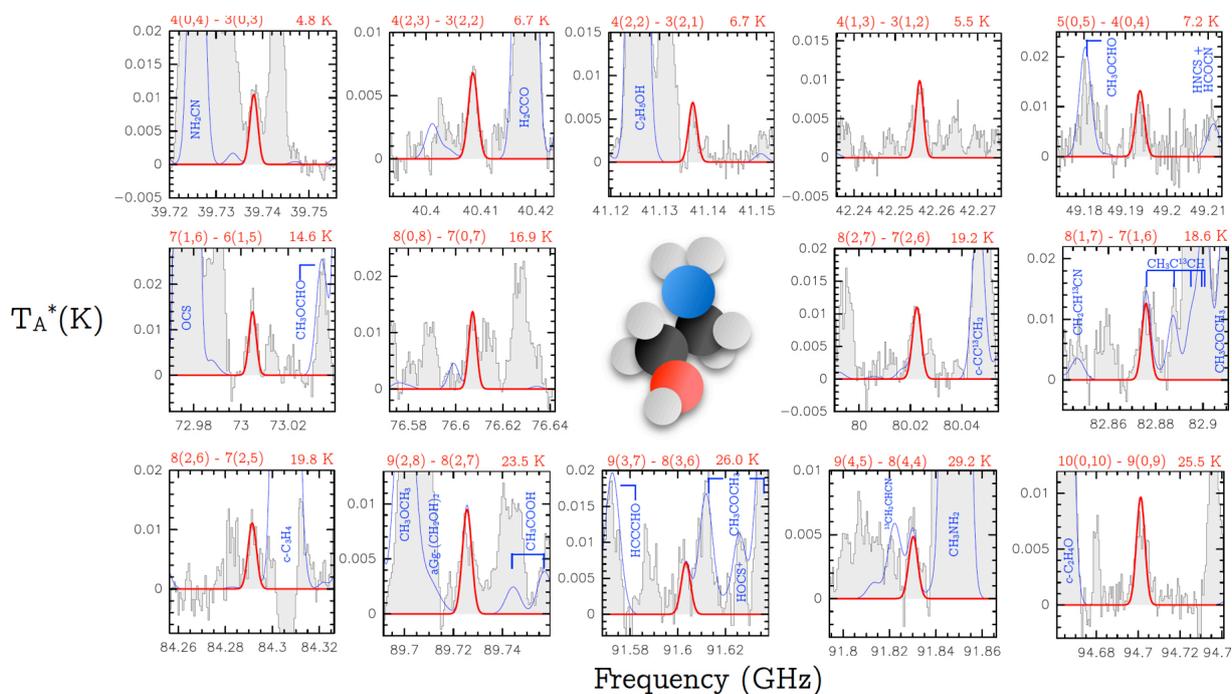
exquisita, cercana al milikelvin, que nos permitió detectar la presencia de etanolamina por primera vez en el espacio. El descubrimiento se publicó a mediados de este año en la prestigiosa revista [Proceedings of the National Academy of Sciences \(PNAS\)](#).

En la Figura 3 se muestran las catorce transiciones rotacionales limpias (libres de contaminación por parte de luz procedente de otras especies moleculares) de etanolamina que se han identificado en el barrido espectral de la nube molecular G+0.693-0.027. El análisis realizado, que utiliza condiciones de equilibrio termodinámico local, ajusta perfectamente las transiciones observadas (línea roja en Figura 3), confirmando no sólo la presencia de la molécula en el medio interestelar sino también proporcionando información acerca de la cantidad en la que se encuentra (su abundancia molecular). Nuestras observaciones indican que la etanolamina es unas 10^{-10} veces menos abundante que el hidrógeno molecular (H_2), y en torno a 1000 veces menos abundante que la molécula orgánica compleja más sencilla, el metanol (CH_3OH). Aunque esta abundancia pueda parecer pequeña, en realidad dista mucho de serlo. De hecho, considerando la relación de abundancias entre la etanolamina y el agua en el medio interestelar, y la cantidad de agua que pudo haber llegado a la Tierra transportada por meteoritos, hemos estimado

Figura 2: Radiotelescopios usados para la detección de etanolamina ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) en la nube molecular G+0.693-0.027: Yebes 40m (izquierda), situado en Yebes (Guadalajara, España), e IRAM 30m, situado en Sierra Nevada (Granada, España). Créditos: Wikipedia.



Figura 3: Transiciones rotacionales de etanolamina detectadas en los espectros observados de la nube molecular G+0.693-0.027 (histogramas grises). El mejor ajuste, asumiendo condiciones de equilibrio termodinámico local, se indica con las líneas rojas. La emisión de otras moléculas anteriormente identificadas se indica en azul. Créditos: Rivilla et al. (2021), PNAS, 118 (22) e2101314118.



que cerca de 10^{15} litros de etanolamina podrían haber sido transferidos a la Tierra primitiva desde el espacio. Este volumen es equivalente al del lago Victoria, el segundo lago de agua dulce más grande de la Tierra.

IMPlicACIONES PARA LA QUÍMICA PREBIÓTICA Y EL ORIGEN DE LA VIDA

La detección de etanolamina en la nube molecular G+0.693-0.027 confirma que un posible precursor de fosfolípidos se sintetiza de forma eficiente en las condiciones extremas del medio interestelar. Como consecuencia, la etanolamina podría haber sido transferida de la nube molecular natal de nuestro Sistema Solar a objetos menores como cometas y asteroides, que pudieron posteriormente transportarla a la joven Tierra. Una vez en la superficie de nuestro planeta, la disponibilidad prebiótica de etanolamina, junto con la de ácidos y alcoholes grasos, pudo haber contribuido a la aparición de los primeros fosfolípidos, que formaron membranas celulares mucho más resistentes y eficientes. Esta hipótesis es consistente con [experimentos de química prebiótica](#) que simulan en el labo-

ratorio las condiciones químicas de la Tierra primitiva, y en los que se ha demostrado que la etanolamina es un precursor molecular a partir del cual se pueden formar fosfolípidos. En este escenario, las protocélulas dotadas de nuevas membranas, podrían haber incorporado de su entorno otras especies moleculares necesarias para la síntesis de ARN y para realizar los primeros procesos replicativos y metabólicos.

Los trepidantes avances de la astroquímica en los últimos años, de los cuales la detección de etanolamina es un buen ejemplo, nos están enseñando que los precursores moleculares esenciales para la vida están presentes en las regiones donde se forman nuevas estrellas. No hay duda de que buena parte de los ingredientes básicos para la receta de la vida están disponibles en la cocina de los sistemas planetarios jóvenes. Esto tiene profundas implicaciones no sólo para el origen de la vida en la Tierra, sino también en otros planetas y satélites de nuestro Sistema Solar y en los numerosos exoplanetas descubiertos hasta la fecha fuera de él.