

OPENS: TRAS LOS LADRILLOS DE LA VIDA

El proceso del origen de la vida viene caracterizado por saltos hacia la complejidad química. Estudios recientes muestran que dicha complejidad podría iniciarse en el medio interestelar, el cual podría formar compuestos de tipo prebiótico que posteriormente son incorporados a objetos menores del Sistema Solar como asteroides y cometas. Como resultado, nuestro planeta podría haber recibido grandes cantidades de material prebiótico durante el período de bombardeo masivo que experimentó hace 4100-3800 millones de años, favoreciendo la génesis de las primeras biomoléculas. El proyecto OPENS (the Onset of Prebiotic chEmistry iN Space)¹, que ha sido recientemente seleccionado por el European Research Council dentro del programa ERC CoG 2023, buscará aquellos compuestos prebióticos que se forman en el medio interestelar, y estudiará no sólo sus procesos de formación sino también los procesos de destrucción, determinando la probabilidad de supervivencia de los mismos en las condiciones extremas del medio interestelar.



OPENS



Funded by
the European Union



European Research Council
Established by the European Commission



Izaskun Jiménez-Serra

Centro de Astrobiología (CAB), CSIC-INTA
ijimenez@cab.inta-csic.es

LOS LADRILLOS DE LA VIDA

La cuestión del origen de la vida es uno de los grandes problemas sin resolver en el campo de las ciencias naturales. El consenso general entre la comunidad científica es que la vida surgió en un entorno con atmósfera, agua, y masa continental con nutrientes suficientes para la formación y posterior evolución de los primeros sistemas proto-biológicos [1]. Estos primeros sistemas aparecieron en entornos acuosos como océanos, lagos, lagunas, charcas intermitentes generadas por mareas o sistemas hidrotermales submarinos, en los que abundaba una gran diversidad de nutrientes (principalmente biopolímeros) como el ARN, ADN, proteínas, azúcares y fosfolípidos. Estos compuestos son comúnmente considerados como los componentes básicos de la vida o los “ladrillos de la vida” (ver [2]). En la actualidad se cree que estos nutrientes se sintetizaron abióticamente a partir de compuestos orgánicos más simples también presentes en dichos entornos acuosos.

El origen de dichos compuestos orgánicos más simples, sin embargo, se desconoce. Existen dos escuelas principales que intentan explicar cómo dichos compuestos precursores de ribonucleótidos², azúcares sencillos, proto-lípidos y amino ácidos, aparecieron en entornos acuosos para dar lugar a la primera entidad con vida. La primera escuela considera que estos compuestos orgánicos se sintetizaron in-situ en charcas o torrentes templados donde varias cadenas de reacciones químicas ocurrieron de forma simultánea dando lugar a las primeras biomoléculas (*origen endógeno*). En efecto, trabajos de química prebiótica muestran que, partiendo de compuestos precursores como, por ejemplo, la urea (NH_2CONH_2 ; molécula número (11) en la Figura 1), el 2-aminoxazol ($\text{C}_3\text{H}_4\text{N}_2\text{O}$; molécula número (17) en la misma figura), o la hidroxilamina (NH_2OH ; ver [3, 4]), se pueden sintetizar todos los ribonucleótidos (tanto pirimidinas como purinas) bajo las condiciones físicas y químicas de una Tierra primitiva.

La segunda escuela postula que una fracción significativa de esos compuestos prebióticos se podría haber sintetizado de forma exógena en la nebulosa proto-Solar, y caído a la superficie de nuestro planeta a través de una lluvia intensa de partículas de polvo interplanetario, y del impacto de cometas y meteoritos durante el periodo de bombardeo masivo

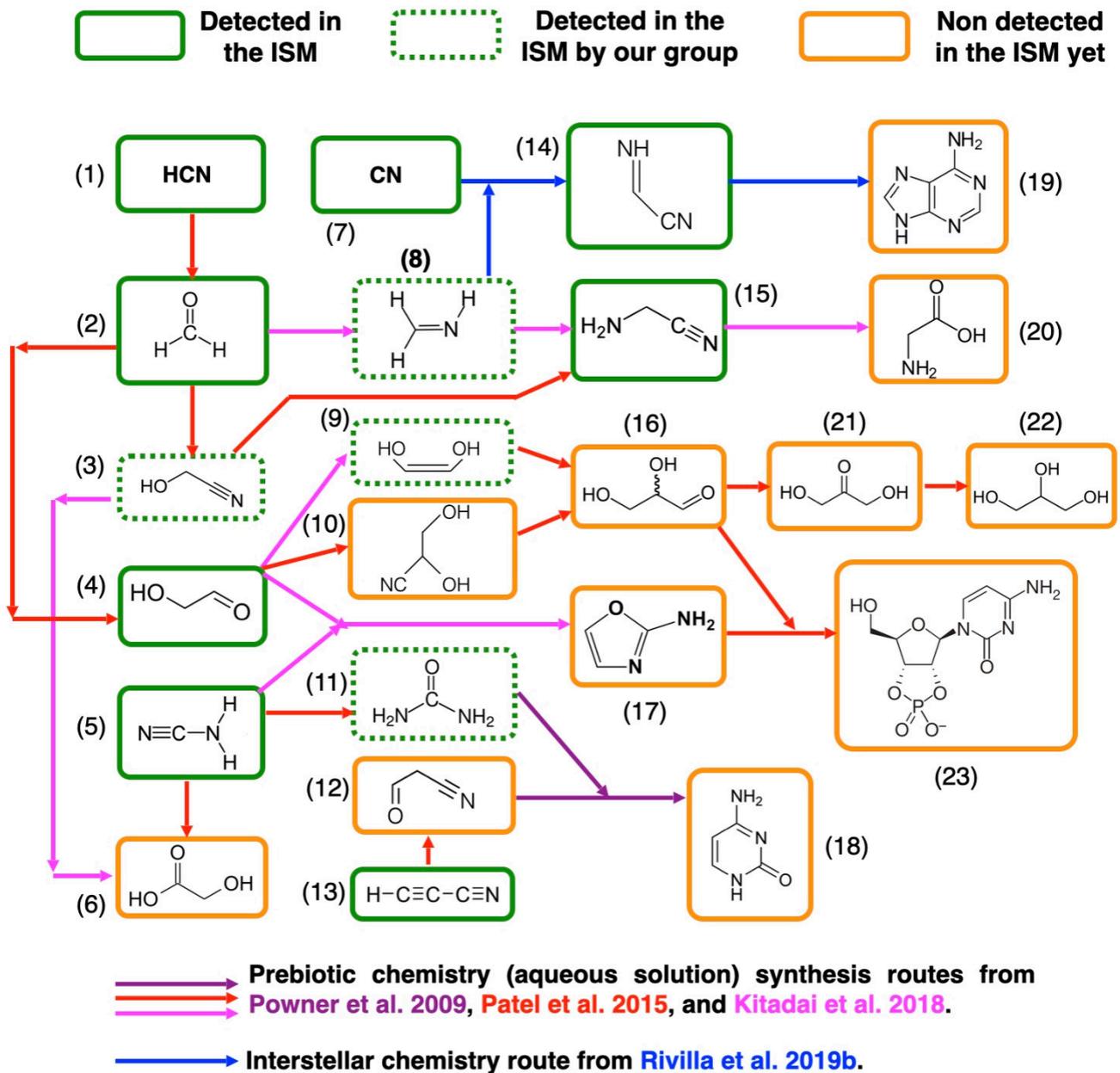


Figura 1. Esquema químico con las moléculas precursoras de ARN, azúcares, proteínas y proto-lípidos más relevantes en química prebiótica (figura adaptada de [13]). En verde mostramos las moléculas que ya se han detectado en el medio interestelar, incluido aquellas reportadas por nuestro grupo (ver las cajas con líneas discontinuas). Algunas de estas moléculas son el glicolonitrilo (ver la molécula número # 3 en el esquema), el etenediol (# 9), o la cianometanimina (molécula #14), un precursor de la nucleobase adenina. En naranja se muestran las especies moleculares que no se han detectado todavía en el medio interestelar, y que buscaremos dentro del proyecto OPENS (ver, por ejemplo, 2-amino-oxazol (molécula # 17 en el esquema) o el gliceraldehído (# 16).

tardío (del inglés “Late Heavy Bombardment period”) hace 4100-3800 millones de años. Se estima que la cantidad de material orgánico que pudo llegar a la superficie de la Tierra durante este periodo es de 10^{16} - 10^{18} kg [5], una cifra considerable teniendo en cuenta que la cantidad actual de materia orgánica presente en la biosfera es de 6×10^{14} kg. El estudio químico de meteoritos muestra, en efecto, que aminoácidos, nucleobases y azúcares forman parte de su composición (véase [6, 7, 8]). La misión *Rosetta* de la agencia espacial europea (ESA) también ha reportado la presencia de glicina, el amino ácido más sencillo, en el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko [9]; y la misión Hayabusa2 de la agencia espacial japonesa (JAXA) ha encontrado uracilo (una de las cuatro nucleobases que forman el ARN) en el asteroide Ryugu [10]. Todo esto, unido al hecho de que la vida apareció poco después del periodo del “Late Heavy Bombardment”, sugiere que la formación exógena de compuestos prebióticos y su posterior llegada a la superficie de la Tierra, fue decisiva en el proceso del origen de la vida [2, 11, 12].

EL MEDIO INTERESTELAR COMO ORIGEN DE COMPUESTOS PREBIÓTICOS

En la última década, y sobre todo gracias a la misión *Rosetta*, ha quedado patente que la composición química del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko (un cometa de la familia de Júpiter y cuyo origen se encuentra en el cinturón de Kuiper), es de origen pre-solar, es decir, de antes de que se formara el Sol. Por lo tanto, los compuestos orgánicos encontrados en dicho cometa proceden de la nube molecular parental interestelar [9, 14, 15].

El medio interestelar se caracteriza por condiciones de presión de ultra-alto vacío y temperaturas cercanas al cero absoluto (10 K). A pesar de estas condiciones extremas, el medio interestelar es una máquina extraordinaria generadora de compuestos químicos. Hasta la fecha (15/11/2024), se han descubierto más de 324 moléculas en el medio interestelar (ver e.g. [16])³, de las cuáles el 50% son moléculas orgánicas complejas (o COMs, del inglés “Complex Organic Molecules”, definidas como compuestos a base de carbono con al menos 6 átomos en su estructura molecular; [18]). Estas moléculas orgánicas complejas han despertado un gran interés en los últimos años en el campo de la astroquímica por su

posible relación con compuestos prebióticos. Algunos ejemplos de moléculas presentes en el medio interestelar y que aparecen en esquemas de química prebiótica son la formamida (NH_2CHO) o el glicolaldehído (CH_2OHCHO ; ver [4, 19, 20]).

UN MÉTODO INNOVADOR E INTERDISCIPLINAR

En el año 2018 comencé un nuevo proyecto en el Centro de Astrobiología (CAB) para entender si los compuestos clave en esquemas de química prebiótica se pueden formar en el medio interestelar. Para ello, guiamos la búsqueda de nuevos compuestos moleculares en el espacio usando los esquemas químicos propuestos en teorías del origen de la vida. En particular, nos centramos en los esquemas de formación de ribonucleótidos en el contexto de teorías de un mundo ARN primordial (ver [13]). En este escenario prebiótico las primeras formas de vida dependen únicamente del ARN, que almacena información genética y cataliza reacciones químicas (véase [3], [4], [12], [20]). Gracias a este enfoque novedoso, nuestro grupo en el CAB ha descubierto no sólo precursores clave en la formación de ribonucleótidos como, por ejemplo, urea (NH_2CONH_2 [13]), hidroxilamina (NH_2OH [21]), o glicolonitrilo (HOCH_2CN , [22]), sino también precursores en la formación de proto-lípidos (etanolamina, $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ [23]; o n-propanol, n- $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$, [24]; ver también la Figura 2), amino ácidos (amina vinílica, $\text{C}_2\text{H}_3\text{NH}_2$, y amina etílica, $\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_2$; [25]), y otras especies clave en la síntesis de proto-proteínas (ácido mono-tiofórmico, HC(O)SH [26]; o isocianato de etilo, $\text{C}_2\text{H}_5\text{NCO}$ [27]).

Para realizar todas estas nuevas detecciones, hemos obtenidos barridos espectroscópicos ultra-sensibles en el rango de 7mm, 3mm, 2mm y 1mm con los radiotelescopios de Yebes de 40m de diámetro y de 30m de diámetro del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM), hacia la nube molecular G+0.693 situada en el centro de la Vía Láctea, uno de los mayores repositorios de material orgánico complejo en nuestra Galaxia. En total, desde 2019 hemos reportado la detección de 24 nuevas especies moleculares en el medio interestelar. Sin embargo, estas especies representan la punta del iceberg, ya que nuestros estudios espectroscópicos de alta sensibilidad aún no han alcanzado el límite de confusión en líneas moleculares. Además, hasta ahora sólo nos hemos centrado en la búsqueda de moléculas relativamente

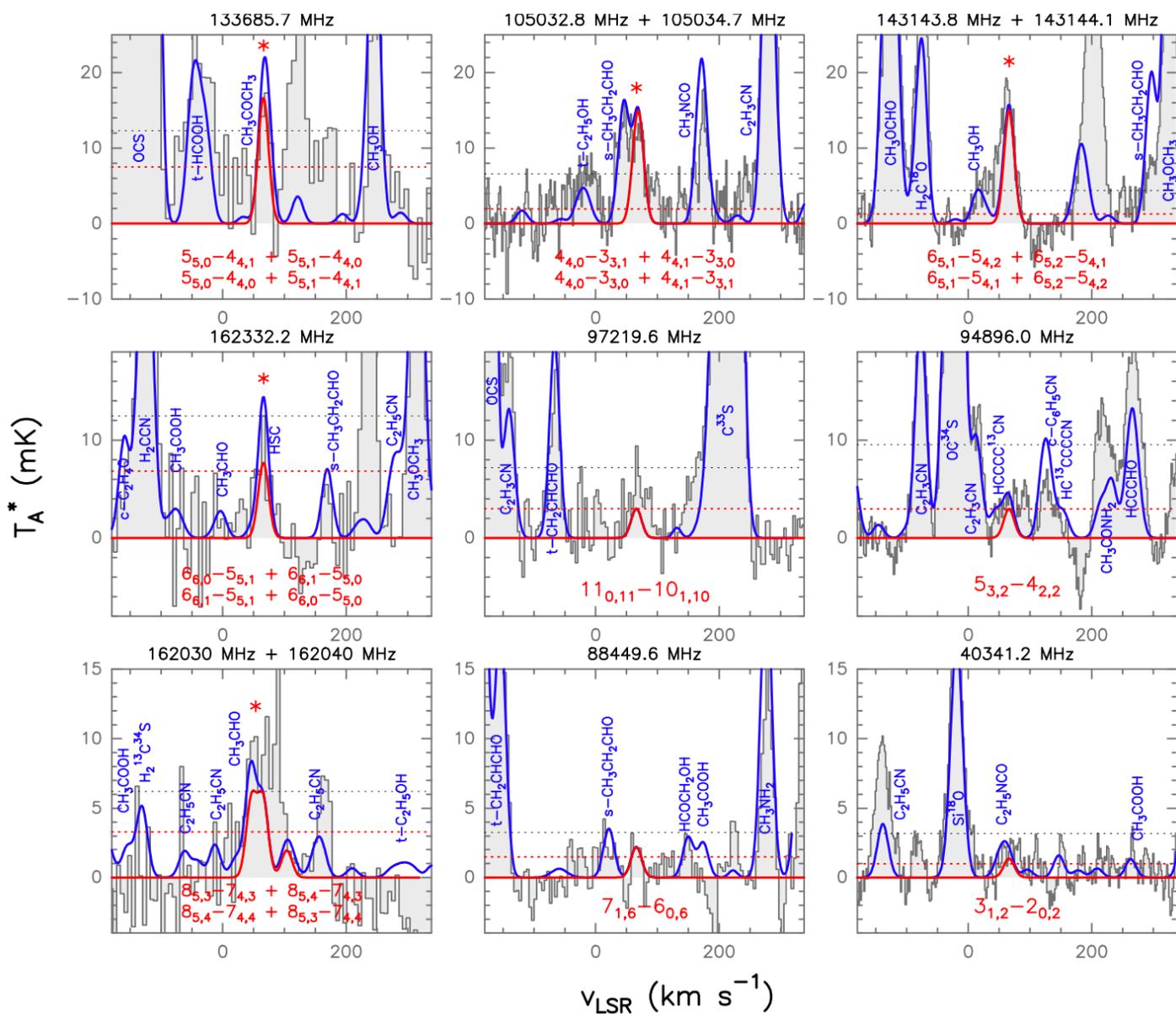


Figura 2. Transiciones detectadas del conformero Ga de n-propanol. En negro y gris se muestra el espectro medido hacia la nube molecular G+0.693 situada en el Centro Galáctico. En rojo se indica la contribución individual de las transiciones de n-propanol, mientras que en azul se representa la contribución de todas las moléculas detectadas hasta la fecha en esta fuente (ver nombres en azul). Figura extraída de [24].

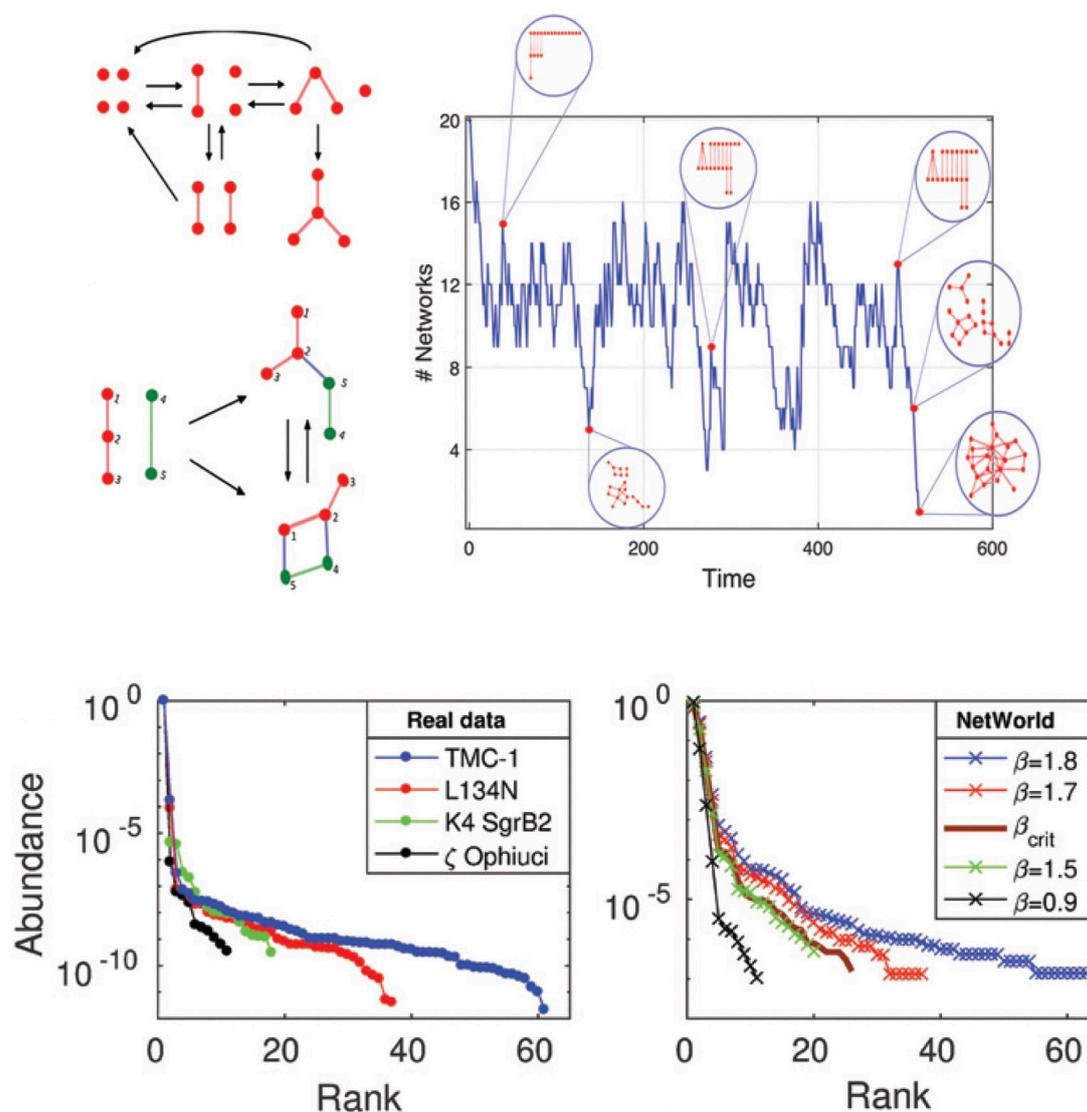


Figura 3. Paneles superiores: Descripción de la dinámica evolutiva de NetworkWorld. Paneles inferiores: Comparación entre datos reales de abundancias moleculares en varias nubes interestelares con distintos niveles de extinción, y las predicciones de NetWorld. Figura adaptada de [28].

pequeñas y, por lo tanto, desconocemos si moléculas prebióticas de mayor complejidad también están presentes en el medio interestelar.

OPENS

El proyecto OPENS (the Onset of Prebiotic chemistry iN Space)¹ pretende descubrir qué compuestos orgánicos, de los propuestos como esenciales para el origen de la vida, están presentes en el medio

interestelar, y cuáles de ellos son heredados por sistemas planetarios jóvenes. Pero, ¿cuál es el origen de la complejidad química observada en el medio interestelar? Para dar respuesta a esta pregunta, OPENS también investigará la emergencia de dicha complejidad química interestelar desde un punto de vista abstracto y novedoso utilizando un marco teórico basado en Teoría de Redes Complejas que acabamos de desarrollar (*Networld*; ver [28] y Figura 3).

OPENS construirá un equipo con expertos en observaciones astronómicas, en experimentos de laboratorio con análogos de hielos interestelares, en cálculos cinéticos moleculares, y en teoría de redes complejas. Estudiaremos la complejidad química en el espacio tanto en la fase gas como en la fase sólida en el polvo interestelar, abarcando compuestos prebióticos (incluyendo moléculas quirales) precursores de ribonucleótidos, proto-lípidos, proto-proteínas y azúcares. Estudios piloto que hemos realizado recientemente muestran que no todas las moléculas propuestas en esquemas de química prebiótica tienen la misma capacidad de supervivencia en las condiciones extremas del medio interestelar. Por ejemplo, la urea es mucho más resistente a la radiación UV o a la interacción con rayos cósmicos que el 2-amino-oxazol (véase [29] y [30]), lo que proporciona información clave sobre qué especies son más susceptibles de ser transferidas a asteroides y cometas en la nebulosa proto-solar. Finalmente, puesto que la química del medio interestelar se puede considerar como un sistema complejo, OPENS determinará si la emergencia de moléculas orgánicas complejas en el espacio es el resultado de reglas universales regidas por la Teoría de la Complejidad.

La detección en el medio interestelar de los compuestos esenciales para el origen de la vida en OPENS, representará un gran avance en astroquímica, abriendo un nuevo campo de investigación en el que la química de los componentes básicos de la vida podrá estudiarse directamente en el espacio. Esto nos permitirá comprender cómo pudo originarse la vida en nuestro planeta y qué probabilidades tiene de que surja en otros lugares del Universo.

NOTAS

¹ <https://sites.google.com/view/ercopens/home>

² Los ribonucleótidos son las unidades elementales del ARN y están formados por una molécula de ribosa, una nucleobase, y un grupo fosfato.

³ Una lista actualizada de las moléculas detectadas en el medio interestelar se puede encontrar en el Cologne Database for Molecular Spectroscopy, o CDMS ([17] y <https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules>).

REFERENCIAS

- [1] Dohm & Maruyama, 2015, *Geoscience Frontiers*, 6, 95-101.
- [2] Kitadai et al. 2018, *Geoscience Frontiers*, 9, 1117-1153.
- [3] Powner et al. 2019, *Nature*, 459, 239.
- [4] Patel et al. 2015, *Nature Chemistry* 7, 301-307.
- [5] Chyba & Sagan 1992, *Nature*, 355, 125-132.
- [6] Cronin & Pizzarello 1986, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50, 2419-2427.
- [7] Glavin et al. 2006, *Meteoritics and Planetary Science*, 41, 889-902.
- [8] Furukawa et al., 2019, *PNAS*, 116, 49
- [9] Altwegg et al. 2016, *Science Adv.*, 2, e1600285
- [10] Oba et al. 2023, *Nature Communications*, 14, 1292
- [11] Ruiz-Mirazo et al. 2014, *Chem Rev*, 114, 285
- [12] Menor-Salván et al., 2020, *ChemBioChem*, 21, 3504
- [13] Jimenez-Serra et al. 2020, *Astrobiology*, 20, 1048J
- [14] Altwegg et al. 2019, *ARA&A*, 57, 113A
- [15] Alexander et al. 2017, *M&PS*, 52, 1797A
- [16] McGuire et al. 2022, *ApJS*, 259, 30M
- [17] Endres et al. 2016, *Journal of Molecular Spectroscopy*, 327, 95
- [18] Herbst & van Dishoeck 2009, *Ann. Rev. of Astr. and Astroph.*, 47, pp 427- 480
- [19] Saladino et al. 2012, *Physics of Life Reviews* 9, 84-104
- [20] Becker et al., 2019, *Science*, 366, 76
- [21] Rivilla et al. 2020b, *ApJL*, 899, L28
- [22] Zeng et al. 2019, *MNRAS*, 484, L43-L48
- [23] Rivilla et al., 2021, *PNAS*, 118 (22) e2101314118
- [24] Jimenez-Serra et al. 2022, *A&A*, 663A, 181J
- [25] Zeng et al., 2021, *ApJL*, 920, L27
- [26] Rodríguez-Almeida et al. 2021a, *ApJL*, 912, L11
- [27] Rodríguez-Almeida et al. 2021b, *A&A*, 654, L1
- [28] García-Sánchez et al. 2022, *PNAS*, 119 (30) e2119734119
- [29] Mate et al. 2021, *ApJ*, 909, 123M
- [30] Herrero et al. 2022, *MNRAS*, 517, 1058H