

Astrobiología

Una visión transdisciplinaria
de la vida en el universo

*Lilia Montoya, Guadalupe Cordero
y Sandra Ramírez (coordinadoras)*



EDICIONES
CIENTÍFICAS
UNIVERSITARIAS

TEXTO CIENTÍFICO
UNIVERSITARIO

EDICIONES CIENTÍFICAS UNIVERSITARIAS

SERIE TEXTO CIENTÍFICO UNIVERSITARIO

ASTROBIOLOGÍA

Astrobiología

UNA VISIÓN TRANSDISCIPLINARIA DE LA VIDA EN EL UNIVERSO

Coordinadoras

LILIA MONTOKA LORENZANA
MARÍA GUADALUPE CORDERO TERCERO
SANDRA IGNACIA RAMÍREZ JIMÉNEZ



FONDO DE CULTURA ECONÓMICA
INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES

Primera edición en libro electrónico, 2022

Montoya Lorenzana, Lilia, María Guadalupe Cordero Tercero y Sandra Ignacia Ramírez Jiménez (coords.)

Astrobiología. Una visión transdisciplinaria de la vida en el universo / coord. de Lilia Montoya Lorenzana, María Guadalupe Cordero Tercero y Sandra Ignacia Ramírez Jiménez. — México : FCE, UNAM, ICN, 2022

666 p. : ilus. ; 23 × 17 cm — (Colec. Ediciones Científicas Universitarias)

ISBN 978-607-16-7450-0 (electrónico, PDF - FCE)

ISBN 978-607-30-5809-4 (electrónico, PDF - UNAM)

1. Exobiología 2. Evolución molecular 3. Vida en otros planetas 4. Vida – Origen 5. Biología 6. Astronomía I. Cordero Tercero, María Guadalupe, coord. II. Ramírez Jiménez, Sandra Ignacia, coord. III. Ser. IV. t.

LC QH326

Dewey 574.999 M454

Distribución mundial en español

D. R. © 2022, Universidad Nacional Autónoma de México
Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán; 04510 Ciudad de México

Instituto de Ciencias Nucleares
Circuito Exterior s. n., Ciudad Universitaria, Coyoacán; 04510 Ciudad de México

D. R. © 2022, Fondo de Cultura Económica
Carretera Picacho-Ajusco, 227; 14110 Ciudad de México
www.fondodeculturaeconomica.com
Comentarios: editorial@fondodeculturaeconomica.com
Tel. 55-5227-4672

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales

Diseño de portada: Neri Ugalde Guzmán

ISBN 978-607-16-7450-0 (electrónico, PDF - FCE)

ISBN 978-607-30-5809-4 (electrónico, PDF - UNAM)

Hecho en México • *Made in Mexico*

SUMARIO

<i>Agradecimientos</i>	11
<i>Prefacio</i>	13
I. <i>La astrobiología y su desarrollo en México</i> , Sandra Ignacia Ramírez Jiménez	15
II. <i>El universo</i> , Leticia Carigi	34
III. <i>Sistemas planetarios</i> , Antígona Segura	61
IV. <i>La Tierra como planeta habitable</i> , María Guadalupe Cordero Tercero y Sandra Ignacia Ramírez Jiménez	118
V. <i>El registro fósil de los minerales</i> , Elizabeth Chacón Baca, Esther M. Cruz Gámez y Augusto A. Rodríguez Díaz	160
VI. <i>La vida en la Tierra</i> , Irma Lozada-Chávez	179
VII. <i>El origen de la vida en la Tierra</i> , Irma Lozada-Chávez y Peter F. Stadler	224
VIII. <i>La evolución biológica</i> , Irma Lozada-Chávez, Lilia Montoya Lorenzana, María Guadalupe Cordero Tercero, Cruz Lozano Ramírez y Julio E. Valdivia Silva.	312
IX. <i>Extremófilos y ambientes extremos</i> , Lilia Montoya Lorenzana y Sandra Ignacia Ramírez Jiménez	381
X. <i>Astrobiología en Marte</i> , María Guadalupe Cordero Tercero y Julio E. Valdivia Silva.	414
XI. <i>Astrobiología en los satélites del sistema solar</i>	455
<i>Titán</i> , Sandra Ignacia Ramírez Jiménez.	455
<i>Europa</i> , Lilia Montoya Lorenzana y María Guadalupe Cordero Tercero . . .	502
<i>Encélado</i> , Lilia Montoya Lorenzana y María Guadalupe Cordero Tercero . .	525
<i>La Luna</i> , Elva Escobar Briones.	540
XII. <i>Vida en el universo</i> , Antígona Segura y Leticia Carigi	554
XIII. <i>El sentido astrobiológico de la vida en la Tierra</i> , Irma Lozada-Chávez y Roberto Aretxaga-Burgos	593
<i>Glosario</i>	635
<i>Sobre los autores</i>	657
<i>Índice general</i>	661

Tantos poetas he escuchado
entre las llamas de mi soledad
que las notas de mi alma
no comprenden aún
por qué la vida lucha
encerrada en los fierros del universo.

*Kabä xtayañob ubibil kcha'an
Tyi k'ak'al kbañelil,
Jiñi ir'ay kpusikal
Maañik mi ch'amben isum
Chukoch jiñi bak'tyaläl
Letyojibil tyi joy ñup'ul*

JUANA KAREN PEÑATE
¿Por qué?, ¿Chukoch? (ch'ol)

AGRADECIMIENTOS

La presente obra fue realizada con el apoyo financiero de la UNAM a través del Instituto de Ciencias Nucleares y la Coordinación de la Investigación Científica y de la Dirección General de Apoyo al Personal Académico (DGAPA) mediante el programa PAPIIME a través del proyecto PE111720.

Para la elaboración de los capítulos VI, VII, VIII y XIII, Irma Lozada-Chávez agradece los apoyos financieros del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt, núm. 185993) y del Instituto Max Planck para las Matemáticas en las Ciencias de Leipzig (Alemania), así como la revisión realizada por Luis José Delaye-Arredondo y el apoyo con el lenguaje de programación R de Alejandro Nabor Lozada-Chávez para la elaboración de gráficas y figuras.

Para la elaboración de los capítulos I, IV y IX, y la sección sobre Titán en el capítulo XI, Sandra Ignacia Ramírez Jiménez agradece los apoyos financieros del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través de los proyectos A3-S-65162 y 377887.

PREFACIO

Imagina una noche tranquila en la que observas un cielo adornado con miles de luces titilantes. Si te mantienes así durante varios minutos, será inevitable que te sientas pequeño en un universo majestuoso en el que existe una infinidad de estrellas, planetas y galaxias. Inevitablemente te preguntarás: ¿estamos solos? Interesantemente esta pregunta se la han planteado otras personas en otros tiempos que han buscado respuestas apelando a razonamientos de distinta naturaleza. Una manera científica de obtener estas respuestas es por medio de la astrobiología.

Una alegoría que puede ayudar a visualizar a la astrobiología es la de un mosaico multicolor formado por pequeñas piezas integradas armónicamente en una obra atractiva, además de elegante, artística, comunicativa, polémica y retardora. En esta alegoría, los conocimientos, las metodologías, las experiencias, las técnicas, los instrumentos, las herramientas y, por supuesto, las preguntas de diversos campos del conocimiento, son las piezas que buscan embonar naturalmente y crear el ámbito de acción de la astrobiología, nuestro mosaico multicolor, cuyas aspiraciones se centran en el estudio de la vida como un fenómeno planetario. Si bien la Tierra es el único lugar en el universo donde existe, hasta ahora, evidencia contundente de la presencia de seres vivos, la comprensión de los requerimientos mínimos de los seres que la habitamos incentiva el estudio y la exploración del sistema solar y de otros sistemas estelares en diversos rincones del universo para determinar si en alguno de ellos existen o existieron los requerimientos que permiten la vida, simple o compleja.

Este afán por conocer lugares más allá de la Tierra ha motivado el desarrollo de avances tecnológicos y la convergencia de muy variados conocimientos, lo que imprime un carácter multi, inter y transdisciplinario a la astrobiología, características que se tornan en retos y virtudes, ya que lograr la coincidencia del vasto conjunto de conocimientos necesarios para el cumplimiento de sus objetivos es una tarea titánica. Afortunadamente, los pequeños aportes que puede hacer cada especialista en alguna de las áreas centrales para la astrobiología contribuyen a la obtención de respuestas, a la formulación de hipótesis innovadoras o al desarrollo de tecnologías novedosas. Aportes que incluyen el esfuerzo de acercar lenguajes, metodologías y estrategias para seguir construyendo este mosaico multicolor.

Esta obra fue concebida para subsanar la falta de un texto introductorio a la astrobiología en nuestro lenguaje y se fue configurando con la colaboración de especialistas en los temas que se exponen. Cada especialista ha contribuido con su propio color y forma, compartiendo su experiencia en investigación, en enseñanza o en difusión para desarrollar, con un lenguaje accesible pero riguroso, lo más relevante y actualizado de la amplia gama de temas inherentes a la astrobiología. El libro está organizado en 13 capítulos. Comienza con la descripción de la astrobiología, así como con su desarrollo en México y en el mundo. Los siguientes dos capítulos relatan el origen del universo y de los sistemas planetarios. Las características que hacen habitable a la Tierra y una descripción de la historia de la vida sobre su faz se analizan en los siguientes dos capítulos. Las dificultades asociadas a la definición de la vida, así como su origen y su evolución, se presentan en los siguientes tres capítulos. Las características esenciales de los extremófilos se puntualizan en el siguiente capítulo. La relevancia astrobiológica de Marte y de algunos de los satélites del sistema solar se examina en los dos siguientes capítulos. El penúltimo capítulo describe las estrategias de búsqueda de vida inteligente en el universo, mientras que en el último se presentan algunos aspectos filosóficos sobre la vida extraterrestre.

El libro está dirigido al lector o lectora que se inicia en la astrobiología y que tenga un contexto universitario, esto es, estudiantes de licenciatura en ciencias naturales, ciencias exactas, ingeniería o filosofía. Cada capítulo contiene, además del desarrollo del tema, actividades de revisión que pueden ser ejercicios numéricos, temas de discusión, proyectos temáticos, pequeñas investigaciones o el escrutinio del estatus actual de alguna misión de exploración. Se incluye también una bibliografía especializada, así como materiales de consulta, impresos o electrónicos, que permiten ampliar o ahondar en los conceptos descritos en los diferentes capítulos. Finalmente, la obra contiene un glosario para la consulta rápida de algún concepto que en primera instancia sea desconocido o confuso.

El mosaico multicolor necesita seguir construyéndose. Confiamos en que, con esta obra, el lector encuentre abundantes ocasiones para colocar piezas que lo enriquezcan con sus colores y sus formas.

LILIA MONTOYA LORENZANA
MARÍA GUADALUPE CORDERO TERCERO
SANDRA IGNACIA RAMÍREZ JIMÉNEZ

México, noviembre de 2020

I. LA ASTROBIOLOGÍA Y SU DESARROLLO EN MÉXICO

SANDRA IGNACIA RAMÍREZ JIMÉNEZ*

INTRODUCCIÓN

La astrobiología es un área multidisciplinaria del conocimiento que se ocupa del estudio de la vida como un fenómeno planetario. Tradicionalmente se define como el estudio del origen, la evolución, la distribución y el destino de la vida en el universo; estudia las condiciones que permitieron el surgimiento de la vida en la Tierra, determina si condiciones similares existen o existieron en otros objetos planetarios del sistema solar, o de otros sistemas planetarios, e investiga todos los nichos en los que se manifiesta la vida en la actualidad.

El siglo XXI es un periodo relevante para realizar estudios que permitan alcanzar los objetivos centrales de la astrobiología, ya que es posible reunir, de manera organizada, rápida y accesible, el vasto conjunto de conocimiento de diversas investigaciones en distintos campos de especialidad gracias al avance de las herramientas informáticas y del manejo de información. Las generaciones posteriores al cambio de milenio hemos sido testigos del descubrimiento de planetas extrasolares (capítulo III); hemos seguido muy atentamente las evidencias que apuntan a que Europa, uno de los satélites naturales del planeta Júpiter, alberga un océano de agua líquida bajo su gruesa superficie de hielo (capítulo XI); hemos visto transitar los debates acerca de la veracidad de la presencia de actividad biológica fosilizada en el meteorito ALH 84001 proveniente de Marte (capítulo X); nos hemos maravillado con el descubrimiento de la existencia de vida en ambientes terrestres extremos (capítulo IX) y hemos presenciado el revolucionario avance en el entendimiento y la manipulación de los mecanismos genéticos que operan en la célula viva (capítulo VIII). Los años posteriores al año 2000 nos han permitido atestiguar el éxito de una de las misiones de exploración espacial más ambiciosas: el viaje de la misión Cassini-Huygens hacia el planeta Saturno y sus

* Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos: <https://orcid.org/0000-0002-4344-0896>.

satélites para observarlos de cerca (capítulo XI), así como el desarrollo de misiones de búsqueda de planetas habitables en los sistemas extrasolares, como la centrada en el telescopio espacial Kepler (capítulo XII). Hacia el inicio de la primera década del nuevo milenio el astromóvil *Curiosity* fue enviado a la superficie de Marte para estudiar la geología de la superficie del planeta rojo, con el fin de buscar evidencia de vida microscópica pasada o presente. Los prometedores resultados de esta misión motivaron el desarrollo del astromóvil *Perseverance*, enviado a Marte el 30 julio de 2020 junto con el helicóptero *Ingenuity*, para buscar vida microbiana antigua en el cráter Jezero, estudiar más detalladamente la geología marciana y coleccionar muestras de suelo que puedan enviarse a la Tierra. Este lanzamiento estuvo precedido por el del orbitador *Hope*, la primera misión de exploración de la Agencia Espacial de los Emiratos Árabes Unidos, lanzada el 19 de julio de 2020 y preparada para investigar detalles de la tenue atmósfera marciana, así como la ocurrencia de tormentas de arena en la superficie de Marte. El 23 de julio de 2020 la Administración Espacial Nacional china se unió a la exploración robótica de Marte y lanzó la misión Tianwen conformada por un orbitador, un módulo de aterrizaje y un astromóvil que aspiran a demostrar su capacidad para explorar el planeta rojo orbitándolo, analizando regiones específicas de la superficie y preparando una misión de retorno de muestras marcianas para 2030. Se espera que estas tres misiones lleguen a Marte en febrero de 2021.

Agencias internacionales académicas y tecnológicas se han dado a la tarea de motivar y coordinar actividades de investigación, de innovación tecnológica y de formación de recursos humanos con la finalidad de acercarnos más a la comprensión del denominado universo observable (capítulo II), del origen y la evolución de la vida en la Tierra (capítulos VI y VII) a través del estudio del registro fósil (capítulo V); de evaluar las posibilidades y las capacidades que tiene la vida que conocemos para iniciar su expansión hacia otros mundos en el sistema solar (capítulos X y XI) o en el universo, y de seguir profundizando en los detalles de planetas ubicados en la denominada zona de habitabilidad de su estrella (capítulo III), en la estabilidad del medio ambiente terrestre (capítulo IV) y en la posibilidad de que el momento de acoplamiento de toda la compleja maquinaria química-biológica-ambiental que permitió el surgimiento de la vida en la Tierra ocurra en algún otro punto del universo (capítulo XIII). En este escenario, se ha ido delineando esta área multidisciplinaria dinámica, ambiciosa, fundada en un conjunto de preguntas que han permanecido latentes y en espera de respuestas concretas con el paso de los siglos y que se ve fortalecida con el potencial de un gran número de investigadores, quienes, buscando ampliar las fronteras de su conocimiento,

se han aventurado hacia otras áreas, antes lejanas y desconocidas, pero que van madurando con propuestas elaboradas desde un enfoque distinto, con una forma de trabajo innovadora, así como con un espíritu de colaboración y participación orientados hacia un fin común: contribuir a dar respuestas acerca del origen, la distribución y el futuro de la vida en el universo. Es así como, a grandes rasgos, puede definirse el quehacer de la astrobiología y de ese modo se espera que el contenido de este libro ayude a sus lectores a descubrirlo en detalle. La figura 1.1 ilustra muy acertadamente los diversos campos de acción, así como las amplias escalas de espacio y tiempo, en que pueden enmarcarse las investigaciones de la astrobiología. Este mural se encuentra en las instalaciones del Centro de Investigación Ames de la NASA¹ y fue creado por los investigadores David J. DesMarais, Thomas W. Scattergood y Linda L. Jahnke en 1986 para representar lo que ellos denominaron la evolución cósmica: el origen de las galaxias, los sistemas planetarios, las estrellas y los elementos químicos (esquina superior izquierda) útiles para sintetizar moléculas prebióticas y estructuras como el ARN y el ADN que facilitaron el surgimiento de las primeras formas de vida en la Tierra primitiva (esquina inferior izquierda); los que fueron aumentando su complejidad y se diversificaron conquistando prácticamente todo el planeta (centro-derecha) y, mediante diversas presiones de selección, evolucionaron propiciando el surgimiento de seres inteligentes capaces de desarrollar conocimiento y tecnología que les permite observar el universo (esquina superior derecha) y cuestionarse sobre su dinámica, sus estructuras y su origen en escalas macroscópicas y microscópicas. La imagen se popularizó durante los primeros años del siglo XXI debido a la creación del Instituto de Astrobiología de la NASA (Dick, 2010).

ORÍGENES DE LA ASTROBIOLOGÍA

El sustantivo *astrobiología* tiene sus antecedentes en la palabra *exobiología*. La primera ocasión que este vocablo apareció en forma escrita fue en 1953, cuando Hubertus Strughold, médico de origen alemán, analizaba las posibilidades de la existencia de vida en Marte en su libro *The Green and Red Planet: A Physiological Study of the Possibility of Life on Mars* (Strughold, 1953). Algunos años más tarde, Joshua Lederberg, microbiólogo estadounidense galardonado con el Premio Nobel de Medicina y Fisiología, en 1958, definió la exobiología como la ciencia en la

¹ National Aeronautics and Space Administration (NASA): <http://www.nasa.gov>.



FIGURA I.1. Representación de los campos de acción, así como de las escalas de tiempo y espacio inherentes al ámbito de la astrobiología (imagen de la NASA).

que se fundamentaba la extrapolación de los conocimientos de la biología y la medicina de ese entonces hacia otros mundos (Lederberg, 1960). Durante 1960 los conceptos encerrados en la nueva ciencia de la exobiología se modificaron, ya que no sólo se trataba de estudiar la vida fuera de la Tierra sino dentro de este planeta, por lo que a la ciencia encargada de esta labor debía dársele una connotación más general, por lo cual entonces surgió la astrobiología. Los primeros años de la astrobiología como disciplina científica fueron muy fructíferos, sobre todo por los estudios relacionados con la recreación de ambientes primitivos terrestres en el laboratorio y con la síntesis de compuestos orgánicos esenciales para la vida. El ejemplo clásico de este tipo de experimentos es el realizado por Stanley L. Miller, a la sazón estudiante doctoral en química en la Universidad de Chicago, acerca de la síntesis de aminoácidos en condiciones prebióticas (Miller, 1953). También hubo un gran auge y un importante desarrollo tecnológico en lo relativo a la exploración de ambientes fuera de la Tierra, resultado de la carrera entre las agencias espaciales rusa y estadounidense, con notables avances, como la llegada del ser humano a la Luna en julio de 1969.

En 1995 el doctor Wesley T. Huntress, director asociado de los programas de astrofísica y exploración espacial de la NASA, capitalizó el término *astrobiología* para designar un nuevo programa multidisciplinario encaminado a introducir y consolidar a las ciencias biológicas en las actividades de las ciencias espaciales. Este programa constituyó el antecedente intelectual inmediato de los programas

NASA Exobiology y Astronomical Search for Origins. En 1996 el doctor Daniel S. Goldin, director de la NASA, con la ayuda y el apoyo del doctor Gerald Soffen, investigador principal de las misiones Vikingo a Marte, así como del Centro de Investigación Ames, amplían los objetivos del programa en astrobiología y lo definen como la búsqueda del origen, la distribución y el futuro de la vida en el universo (Des Marais *et al.*, 2008).

En 1997 la NASA comenzó a considerar la idea de formalizar los estudios en astrobiología, concentrándolos en un instituto. Esto facilitaría el intercambio de ideas, propuestas y resultados; fortalecería la gestión de recursos económicos para apoyar esas investigaciones, y, sobre todo, permitiría evaluar el funcionamiento de un instituto de investigación virtual enlazado a través de las nuevas tecnologías en comunicaciones, permitiendo a los científicos desarrollar su trabajo sin tener que preocuparse por las barreras geográficas. Entonces se seleccionaron 11 nodos, con el Centro de Investigación Ames como el nodo de administración central. El 19 de mayo de 1998 se anunció la creación del Instituto de Astrobiología de la NASA, o NAI,² conformado por las universidades de Arizona, Colorado, California, Pensilvania, Harvard, Florida y Washington; por los institutos Carnegie, Scripps y Woods Hole, así como por el Centro de Investigación Ames, el Centro Espacial Johnson y el Laboratorio de Propulsión a Chorro, dependientes estos tres últimos de la NASA. Este evento se considera como el nacimiento oficial de la astrobiología en Estados Unidos. El NAI ha permanecido como el organismo encargado de promover, conducir y liderar la investigación en astrobiología y la formación de jóvenes investigadores mediante programas de investigación básica en laboratorios intra y extramuros, misiones espaciales y desarrollo de tecnología avanzada. Para el quinquenio 2003-2008 se incorporaron la Universidad de Indiana, la Universidad de California en Berkeley y la Universidad de Hawái, además de los institutos SETI, el Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA y el Laboratorio de Biología Marina. En 2010 se incorporaron las siguientes entidades: las universidades estatales de Arizona, de Montana, de Pensilvania y de Wisconsin, el Laboratorio Planetario Virtual (Universidad de Washington), el Instituto Carnegie de Washington, los institutos tecnológicos de Georgia y Massachusetts, el Instituto Politécnico Rensselaer, el grupo Mundos Helados y el grupo Titán del Laboratorio de Propulsión a Chorro (NAI, 2010). El Instituto de Astrobiología de la NASA también integra al Centro de Astrobiología de España y al Centro Australiano para Astrobiología como organismos asocia-

² Nasa Astrobiology Institute (NAI): <https://nai.nasa.gov>.

dos, mientras que la Sociedad de Astrobiología de Breña, la Red de Astrobiología de Canadá, la Red de Asociaciones Europeas de Exo/Astrobiología, la Alianza Helmholtz en su capítulo de Vida y Evolución Planetaria, el Instituto de Astrobiología de Colombia, el Consorcio de Astrobiología de Japón, la Red Nórdica de Astrobiología, el Centro de Astrobiología Ruso, la Sociedad Francesa de Astrobiología, la Sociedad Mexicana de Astrobiología, el Centro del Reino Unido para la Astrobiología y la Unidad de Investigación en Astrobiología de la Universidad de São Paulo, como socios afiliados.³

La incorporación de la Sociedad Mexicana de Astrobiología (Soma)⁴ como socio afiliado del NAI ocurrió en 2012. El binomio formado ha contribuido al desarrollo de actividades de divulgación e investigación a través de visitas de investigadores asociados al NAI a México para participar en el Congreso Nacional de Astrobiología y/o la Escuela Mexicana de Astrobiología.

En abril de 2004 la Agencia Espacial Europea (ESA) creó el programa Visión Cósmica 2015-2025⁵ con el apoyo de los gobiernos y las comunidades científica, tecnológica e industrial de 17 países de la Unión Europea. Visualiza colaboraciones con otras agencias espaciales como la NASA y con entidades como el Observatorio del Sur de Europa, el Programa de Observación de la Tierra y el Programa Aurora, así como la Organización Europea de Investigación Nuclear. Se espera que los beneficios del programa no sólo amplíen el conocimiento del espacio sino que también generen beneficios políticos, tecnológicos, culturales y educativos (Bignami *et al.*, 2005).

La Asociación de Redes de Astrobiología Europeas (EANA,⁶ por European Astrobiology Network Association) se formó en 2001 con sede en Ardon, Francia. Entre sus objetivos se encuentran la promoción de la cooperación entre los investigadores europeos relacionados con la astrobiología, la preparación de jóvenes científicos en esta disciplina, la diseminación de los distintos aspectos de la astrobiología entre los países europeos y el establecimiento de contactos entre organismos de distintas agencias europeas, así como con instituciones no europeas y público en general. En 2011 la EANA reconoce a la Soma como un asociado internacional y desde entonces se ha fomentado la participación de diversos miembros de la Soma en las reuniones anuales de la EANA.

³ NAI International Partners: <https://astrobiology.nasa.gov/international-partners/>.

⁴ Sociedad Mexicana de Astrobiología: <http://web.soma.org.mx>.

⁵ Cosmic Vision: <http://sci.esa.int/cosmic-vision/>.

⁶ EANA: <http://www.eana-net.eu/>.

EL OBJETO DE ESTUDIO DE LA ASTROBIOLOGÍA

Si la astrobiología consiste en el estudio de la vida en el universo, es importante considerar con un poco de detalle el significado de “lo vivo”. El reconocimiento de un ser vivo constituye un ejercicio empírico muy sencillo para los seres humanos; el ejercicio de presentar una definición genérica para la vida tal como la conocemos en la Tierra, no lo es. Esto se debe a que para las propuestas y los ejemplos presentados siempre es posible argumentar una contrapropuesta que pone en problemas a la definición presentada. Por ejemplo, una definición originada desde el punto de vista del metabolismo no permite excluir al fuego como algo vivo, ya que éste crece y se reproduce a través de reacciones químicas, requiere energía y produce compuestos químicos como el dióxido de carbono (CO_2), que deshecha al ambiente como lo harían algunos organismos vivos. Por otro lado, una definición sustentada en principios termodinámicos tendría que aceptar a los cristales como algo vivo, ya que una vez que se originan, crecen, generan un orden local y hasta se reproducen. Por estos hechos el ejercicio de proponer una definición para la vida resulta complicado. La práctica común es identificar las características comunes a todos los seres vivos terrestres y aceptar que estas características deben visualizarse y comprenderse en conjunto, no aisladas.

La importancia de contar con una definición para la vida, válida y aprobada por la comunidad científica, radica en el hecho de que los experimentos diseñados para detectar vida a través de las misiones de exploración planetaria son elaborados precisamente partiendo de suposiciones, implícitas o explícitas, de lo que consideramos vivo. Las premisas que se toman como base para el diseño de estos experimentos deben ser robustas para demostrar inequívocamente la presencia o la ausencia de vida en los lugares que se exploran. Recientemente se ha propuesto que en lugar de responder a la cuestión ¿qué es la vida? es necesario formular una teoría científica que permita dar una respuesta contundente. Ésta sería una situación análoga a la ocurrida cuando se formuló la teoría molecular utilizada para responder a cuestionamientos como ¿qué es el agua? y estar en posibilidades de explicar no sólo la construcción de esta molécula partiendo del conocimiento del tipo de interacciones moleculares en las que participan los átomos de hidrógeno y el átomo de oxígeno, sino también estar en posibilidades de comprender sus propiedades físicas y químicas, así como su interacción con otras sustancias, en lugar de conformarnos solamente con describir su apariencia (Chyba y Hand, 2005).

En lo que sí existe consenso es en el reconocimiento de que no es posible que un parámetro único defina la vida. En la Tierra se distingue la materia animada de la materia inanimada en parte por su complejidad química. Los organismos vivos integran un cierto número de elementos químicos, así como de moléculas cuya interacción les permite mantener una estructura física estable, adquirir recursos externos como nutrientes, desechar sustancias que pueden ser tóxicas y utilizar diferentes formas de energía para realizar sus funciones metabólicas. Los elementos biogénicos (C, H, N, O, P, S, Fe y Mg) forman a los tres monómeros básicos para la vida: azúcares, aminoácidos y nucleósidos (figura 1.2), que a su vez se polimerizan y dan origen a biomoléculas como sacarosa, almidón o celulosa, proteínas, nucleótidos que forman los ácidos nucleicos (ARN y ADN) y los lípidos. Las funciones metabólicas de un organismo vivo incluyen el conjunto de reacciones que modifican la naturaleza química de las moléculas presentes en sus células y pueden entenderse como el concierto de reacciones demandantes de energía para lograr la síntesis de biomoléculas, o reacciones anabólicas, y de reacciones proveedoras de energía que conducen a la degradación de los nutrientes, o reacciones catabólicas.

Las particularidades comunes a todos los organismos vivos de la Tierra incluyen: una estructura molecular basada en el carbono, la ocurrencia de reacciones químicas complejas, la presencia de estructuras delimitadas por membranas, un metabolismo biosintético alimentado por fuentes externas de energía y de nutrientes, mecanismos de autorreplicación así como de almacenamiento y transferencia de información genética, y el desarrollo de mecanismos de adaptación progresiva que condujeron a la evolución darwiniana. Aun con el reconocimiento de estas particularidades es difícil avanzar una definición de vida ajena a sesgos antropocéntricos y geocéntricos. Uno de los retos aspiracionales de la astrobiología es precisamente construir una definición de vida que vaya más allá del conocimiento de los organismos terrestres contemporáneos y permita la inclusión de novedosas formas de organismos vivos que tentativamente pudieron haber existido o que habiten lugares más allá de nuestro planeta (Domagal-Goldman *et al.*, 2016).

Se conocen organismos que viven bajo condiciones de extremo frío o calor, en ausencia de oxígeno o de luz, en ambientes altamente ácidos o alcalinos, es decir, en lugares inhóspitos antes impensables como adecuados para la vida. A este tipo de organismos se les conoce como extremófilos y su presencia nos invita a pensar que, dado que las condiciones y los ambientes extraterrestres son considerablemente extremos, cabría esperar que algunos extremófilos terrestres puedan adaptarse y subsistir en mundos con ambientes análogos a los ambientes terrestres extremos en los que han conseguido adaptarse. Los continuos avances

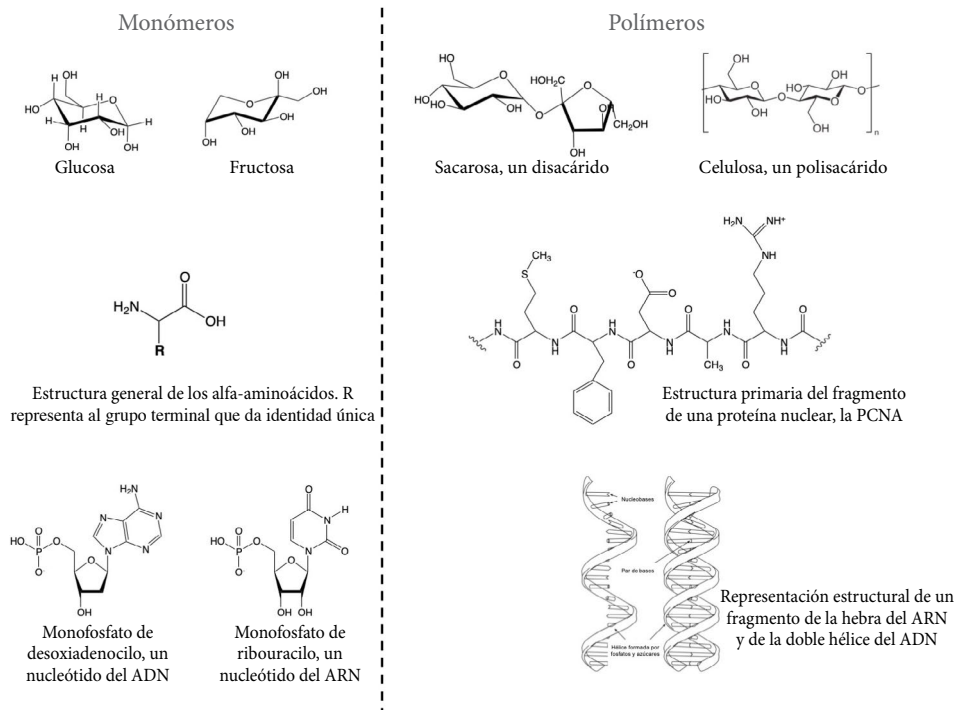


FIGURA I.2. Algunos monómeros y polímeros esenciales para los seres vivos terrestres (imagen de S. I. Ramírez-Jiménez).

en el conocimiento de los organismos extremófilos son de trascendental importancia para la astrobiología, pues si se descubriera vida fuera de la Tierra es muy probable que se encontrase algún organismo parecido a ellos, por lo cual, desde una perspectiva de estudios experimentales, se realizan numerosos proyectos que simulan ambientes espaciales para determinar las posibilidades de vida en esas condiciones (Ramírez, 2010).

¿DÓNDE BUSCAR VIDA?

Con una mejor idea de la diversidad de formas de vida terrestres, para la astrobiología también es importante definir los mejores lugares para iniciar la búsqueda, es decir, ¿dónde esperamos que sea posible encontrar las condiciones adecuadas para la existencia de seres vivos?

En una escala regional, los mejores candidatos en el sistema solar son Marte y los satélites Titán, Europa, Calisto y Encélado. En ninguno se ha encontrado, hasta ahora, evidencia ni siquiera de vida microscópica presente o pasada, aunque algunos de ellos poseen características prometedoras como Titán, cuya geología es semejante a la terrestre según los hallazgos y la información proporcionados por el orbitador Cassini y por la sonda Huygens que se posó en su superficie en 2005. Este satélite es el único del sistema solar que cuenta con una atmósfera densa y fría, formada por nitrógeno molecular (N_2), el mismo componente mayoritario de la atmósfera terrestre, así como por metano (CH_4), la molécula orgánica más sencilla. La radiación solar y posiblemente otras formas de energía locales transforman continuamente estas moléculas en hidrocarburos, que en la Tierra utilizamos como combustibles, y en nitrilos, otro tipo de compuestos formados por elementos biogénicos como C, H y N. Otro de los objetos planetarios que llaman la atención de los astrobiólogos es Europa, uno de los satélites de Júpiter, con una atmósfera muy tenue en la que existe O_2 y una superficie congelada debajo de la cual hay un océano global de agua líquida con sales sulfatadas disueltas. Se ha sugerido que la zona que existe entre el fondo de la corteza congelada y el inicio del océano de agua líquida podría tener valores de temperatura cercanos a los $4^\circ C$ y que en el fondo oceánico podrían existir formaciones semejantes a las ventilas hidrotermales terrestres de las que emanarían nutrientes, con lo cual se sugiere podrían cumplirse las condiciones mínimas para esperar algún tipo de vida microscópica (Ramírez y Terrazas, 2003).

En una escala más amplia, la búsqueda de cuerpos planetarios que pudieran tener las condiciones necesarias que permitan el surgimiento de la vida nos lleva a la arena de los exoplanetas. Si consideramos que hay estimaciones que indican que sólo en la Vía Láctea existen del orden de 1 a 4×10^{11} estrellas y que cada una de estas estrellas puede albergar al menos a un exoplaneta, entonces tenemos que pueden existir al menos 100 000 millones de exoplanetas sólo en la Vía Láctea (Cassan *et al.*, 2012). El actual catálogo de exoplanetas contiene un poco más de 4 000⁷ integrantes confirmados. Para los fines de la astrobiología, este catálogo se reduce a aquellos que, por su temperatura, tamaño, constitución rocosa, posición relativa a su estrella principal, disponibilidad de agua líquida y de nutrientes o elementos a partir de los cuales se pueda obtener energía, se asemejen a la Tierra.

⁷ Enciclopedia de los planetas extrasolares: <http://exoplanet.eu/>, y NASA Exoplanet Exploration: <https://exoplanets.nasa.gov/>.

El destino de la vida en el universo constituye un tema de gran interés, expectación y hasta controversia en nuestra sociedad. ¿Quién hubiera imaginado que existiría un área científica dedicada a descubrir nuestros orígenes o vestigios de vida en la Tierra o, más aún, la posibilidad de que la vida tal como la conocemos pudiera continuar su existencia en algún otro objeto planetario diferente al nuestro? En este sentido, la astrobiología es un pilar científico importante cuya tarea actual es sentar las bases que permitan un mejor manejo y un mayor entendimiento del universo para su óptimo aprovechamiento en un futuro cercano. No sólo desde el punto de vista del enriquecimiento académico, sino también para encontrar nuevos materiales originados en el espacio, diferentes fuentes de energía; además, por supuesto, de la posibilidad de hallar formas de vida que no estén basadas en el ADN o, quizá, ni siquiera en la química del carbono, como la vida terrestre.

PROGRAMAS DE ASTROBIOLOGÍA

El programa de astrobiología de la NASA está fundado en tres ejes: ¿cómo comenzó la vida?, ¿cómo ha evolucionado? y ¿existe vida en algún otro lugar del universo?, que orientan el desarrollo de 17 objetivos (Des Marais *et al.*, 2008). Sus alcances comprenden investigaciones que van desde el estudio astronómico de la formación de estrellas hasta los procesos de adaptación y la ecología microbiana. Cada objetivo tiene una finalidad bien clara, aunque su cohesión en conjunto todavía necesita fortalecerse. La misión de la astrobiología es proporcionar un medio para la convergencia de argumentos filosóficos, académicos y tecnológicos respecto del lugar de la vida en el universo, desde los niveles moleculares hasta los galácticos.

El programa Visión Cósmica 2015-2025 (Bignami *et al.*, 2005) está organizado en torno de cuatro ejes: ¿cuáles son las condiciones necesarias para la formación de un planeta y para el surgimiento de la vida?, ¿cómo funciona el sistema solar?, ¿cuáles son las leyes físicas fundamentales del universo? y ¿cómo se originó el universo y de qué está hecho? Cada eje integra áreas que buscarán respuestas durante las siguientes dos décadas, además de ubicar qué herramienta, técnica o misión espacial puede utilizarse para alcanzar los objetivos planteados. Algunas de estas herramientas o misiones ya están en funcionamiento, otras están en preparación, y se espera que muchas más comiencen a prepararse y a realizarse. Con lo anterior, el crecimiento tecnológico que se espera para 2025 es enorme, así como su impacto en la sociedad y el beneficio hacia actividades de desarrollo estratégico, industrial, cultural y educacional. Ésta es la

respuesta de la Agencia Espacial Europea al reto de la exploración espacial y de la búsqueda de nuestros orígenes.⁸

¿Quiénes participan en la astrobiología?

Las fronteras de la astrobiología son muy amplias, pues dan cabida a un gran número de especialistas de muy diversas ramas del conocimiento, desde paleontólogos, biólogos, químicos, arqueólogos, físicos y astrónomos, hasta climatólogos, oceanógrafos, lingüistas, psicólogos e ingenieros, pasando por terapeutas, médicos, ecologistas, abogados, políticos, filósofos y personas del público en general interesadas en el tema. Todos estos actores pueden interactuar, de diversas maneras, en el desarrollo y el quehacer diario de la astrobiología. Las especialidades mencionadas sólo son ilustrativas y pretenden generar curiosidad acerca del rol de cada una de ellas en esta área multidisciplinaria.

La comunidad astrobiológica en México

En México, la astrobiología es una actividad intelectual que se encuentra en ascendente desarrollo. Esta condición no ha sido una limitante para identificar, de manera muy precisa y en poco tiempo, las labores científicas en las que debe iniciarse investigación, formularse programas de adiestramiento para la formación de recursos humanos y establecerse líneas de colaboración nacional e internacional. En México han existido esfuerzos sólidos encaminados a consolidar una comunidad de astrobiólogos. En 2001 se realizó la Primera Reunión Mexicana de Astrobiología en las instalaciones del Instituto de Ciencias Nucleares (ICN) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en la Ciudad de México, organizada por Rafael Navarro-González, Sandra I. Ramírez Jiménez y Antígona Segura Peralta, adscritos al ICN de la UNAM. Participaron 11 investigadores, siete de ellos provenientes de varias entidades académicas de la propia UNAM, uno proveniente de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), dos profesores invitados de la Universidad de París XII de Francia y un invitado de una asociación civil, la Sociedad Mexicana de Ciencias de la Vida en el Espacio. Adicionalmente, 14 estudiantes presentaron los resultados de sus investigaciones,

⁸ European Space Agency: <http://www.esa.int/ESA>.

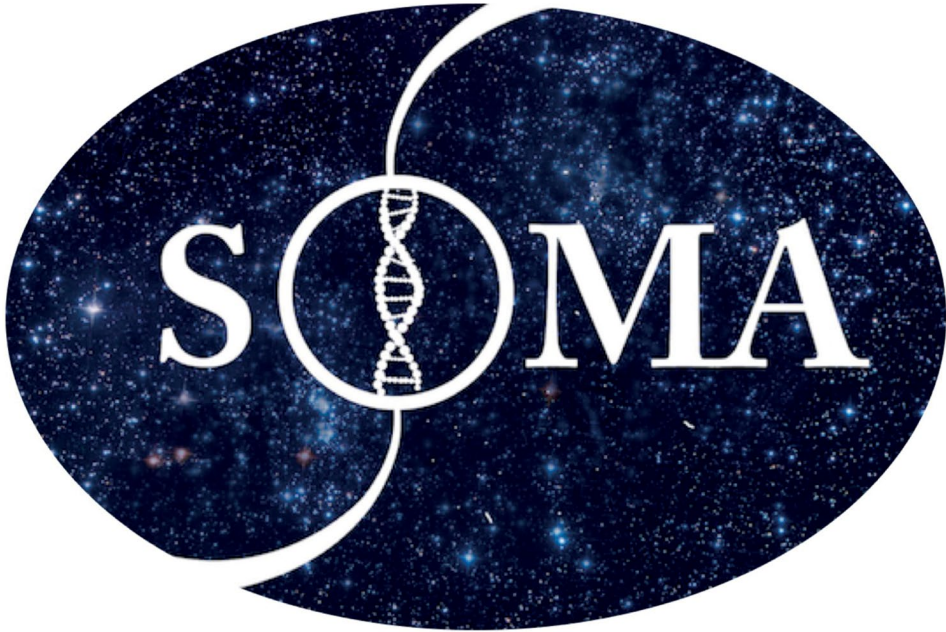


FIGURA 1.3. *Logotipo de la Sociedad Mexicana de Astrobiología, A. C.*
(imagen cortesía de la Soma).

todas éstas relacionadas con la astrobiología, en la modalidad de cartel. Con ese alentador precedente, la Sociedad Mexicana de Ciencias de la Vida en el Espacio decidió reorientar sus objetivos y constituirse, con registro notarial, en la Sociedad Mexicana de Astrobiología⁹ (Soma, figura 1.3), y coorganizar, junto con el Centro de Investigaciones Químicas (CIQ) de la UAEM, la Segunda Reunión Mexicana de Astrobiología en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, en 2002, coordinados por Ramiro Iglesias (Soma), Rafael Navarro González (ICN-UNAM), Thomas Buhse y Sandra I. Ramírez Jiménez (CIQ-UAEM).

A finales de 2002 México tuvo el privilegio de ser sede de la X Conferencia Internacional para el Estudio del Origen de la Vida (ISSOL, por International Society for the Study of the Origin of Life), la cual se organizó junto con la XIII Conferencia Internacional acerca del Origen de la Vida, en la ciudad de Oaxaca. Las actividades académicas se agruparon en los siguientes tópicos: moléculas orgánicas extraterrestres; ambientes de la Tierra primitiva; síntesis prebiótica; polímeros y mecanismos de replicación; viviendo en el mundo del ARN; origen y evo-

⁹ Sociedad Mexicana de Astrobiología: www.soma.org.mx.

lución temprana de las células; genómica evolutiva; vestigios fósiles de la vida; historia, filosofía y educación del origen de la vida, y astrobiología/exobiología. Se desarrollaron 12 lecturas plenarias, 40 contribuciones orales y seis mesas redondas. Se presentaron 155 carteles de investigación y asistieron 450 participantes de 12 diferentes nacionalidades.

Durante el primer semestre de 2003 se organizaron dos ciclos de conferencias sobre astrobiología. Uno de ellos titulado “Astrobiología, ¿es posible la vida fuera de la Tierra?”, coordinado por Elva Escobar Briones del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM y Lilia Montoya Lorenzana. El otro ciclo lo organizó la sociedad Nibiru, A. C., en la Facultad de Ciencias de la UNAM. No es difícil imaginar que, después de un par de semanas, las actividades que originalmente se habían organizado de manera independiente, conjuntaran esfuerzos y compartieran asistentes, ampliando de manera considerable el número de profesores e investigadores interesados en la astrobiología que desarrollan estudios en algún aspecto relacionado con esa materia en nuestro país.

En junio de 2011 la Soma organizó la primera Escuela Mexicana de Astrobiología (EMA, 2011) en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Un grupo de 25 estudiantes de licenciatura y de posgrado recibió clases magistrales de especialistas en astronomía, biología, química, física e ingeniería, y participó en las actividades que se organizaron para ellos durante tres días consecutivos. A partir de estas acciones pioneras se han organizado 11 reuniones nacionales de astrobiología, en años pares, las cuales a partir de 2016 se han convertido en el Congreso Nacional de Astrobiología, y cinco Escuelas Mexicanas de Astrobiología, en años impares (figura 1.4).

LAS SOCIEDADES DE ASTROBIOLOGÍA EN EL MUNDO

La astrobiología se ha convertido en una parte integral de las sociedades intelectuales de muchos países, como se puede ver en el cuadro 1.1.

EL FUTURO DE LA ASTROBIOLOGÍA EN MÉXICO

Los planes de estudio de algunas escuelas y facultades de las universidades mexicanas incluyen asignaturas como origen de la vida, evolución, temas selectos de astronomía, genómica, seminario-taller de astrobiología, química planetaria, etc.

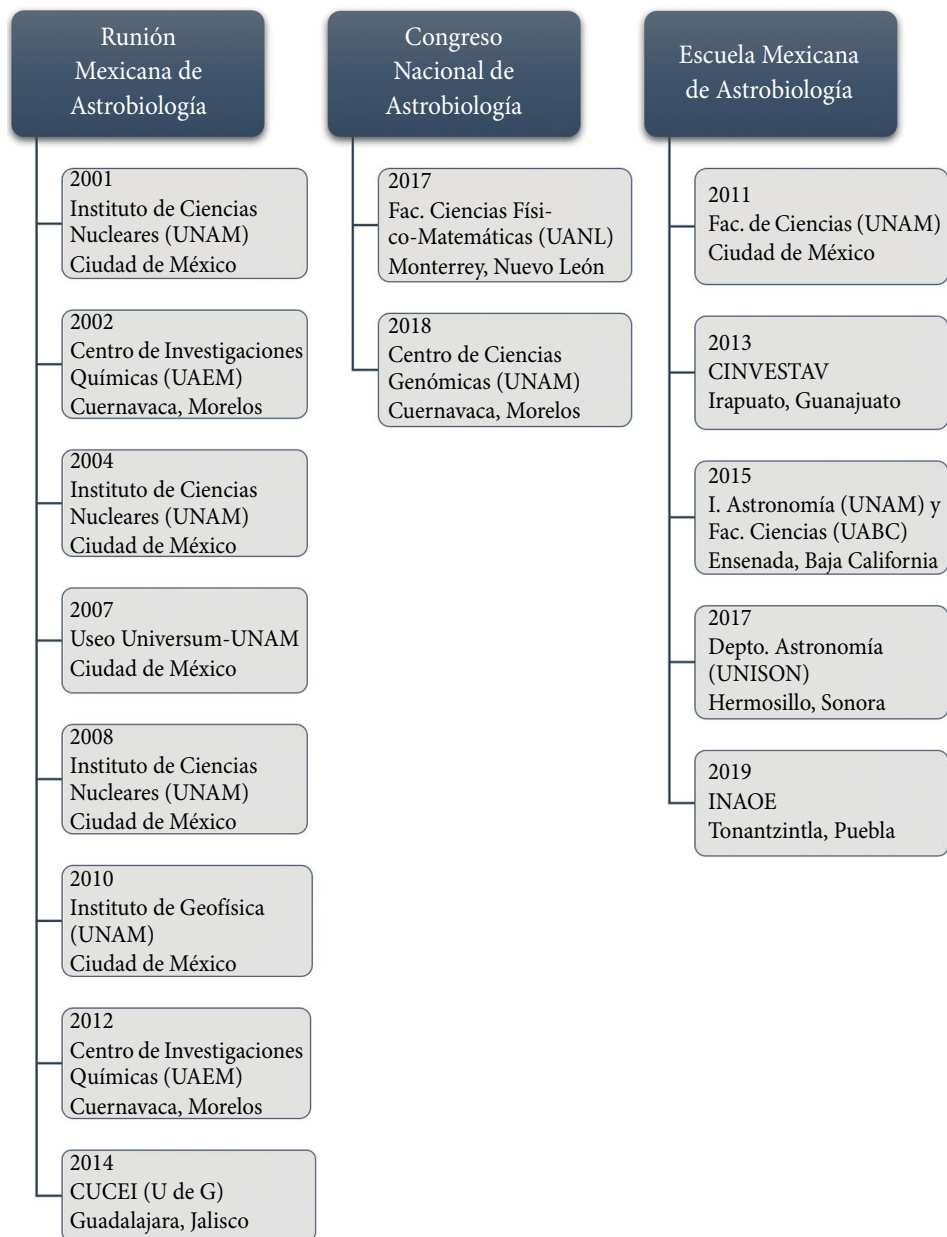


FIGURA 1.4. Sedes en las que se han realizado las actividades sustantivas de la Sociedad Mexicana de Astrobiología, desde su fundación (imagen de S. I. Ramírez-Jiménez).

CUADRO I.1. *Sociedades de astrobiología en el mundo*

<i>Nombre de la sociedad (siglas)</i>	<i>País sede</i>
Nasa Astrobiology Institute (NAI)	Estados Unidos
Sociedad Mexicana de Astrobiología (Soma)	México
Centro de Astrobiología (CAB)	España
Australian Centre for Astrobiology (ACA)	Austria
United Kingdom Centre for Astrobiology	Reino Unido
Groupement de Recherche en Exobiology	Francia
European Exo/Astrobiology Network Association (EANA)	Unión Europea
Russian Astrobiology Center	Rusia
Instituto de Astrobiología de Colombia (IAC)	Colombia
Sociedad Científica de Astrobiología del Perú (SCAP)	Perú
Astrobiology Society of Britain (ASB)	Reino Unido
Canadian Astrobiology Network (CAN)	Canadá
Helmholtz Alliance: Planetary Evolution and Life	Alemania
Nordic Network of Astrobiology	Finlandia
Société Française d'Exobiology (SFE)	Francia
Núcleo de Pesquisa em Astrobiologia (NAP-Astrobio)	Brasil
Japan AstroBiology Consortium (JABC)	Japón

Estas materias constituyeron el semillero del cual surgieron cursos, programas de capacitación y formación docente, manuales de prácticas, demostraciones y actividades de divulgación en temas de astrobiología, actividades que contribuyen a la formación académica de las nuevas generaciones, quienes contribuirán sin duda a la consolidación de esta área del conocimiento.

En la prensa internacional especializada circula la revista *Astrobiology*,¹⁰ publicada desde 2001 por la editorial Mary Ann Liebert, así como el *International Journal of Astrobiology*, publicado desde 2002 por la Cambridge Academic Press. Ambas están sujetas a arbitraje y registran altos índices de impacto en astrobiología. Cada día son más numerosas las sesiones en tópicos de astrobiología que se organizan en diversas conferencias científicas como la Sociedad Química de Norteamérica, la Sociedad Química de México, la Unión Geofísica Americana, la

¹⁰ *Astrobiology*: <https://home.liebertpub.com/publications/astrobiology/99/>.

Unión Internacional de Astronomía, el Comité de Ciencias e Investigación Espacial Europeo y la Federación Internacional de Astronáutica. También han surgido reuniones con temáticas más especializadas, como la Conferencia para Estudiantes Graduados en Astrobiología (*AbGradCon*), la Conferencia Científica de Astrobiología (*AbSciCon*) y la Conferencia de Estudiantes Graduados en Astrobiología en Europa (*AbGradE*). Todas estas reuniones deben tenerse en mente como foros para la difusión de las actividades realizadas en nuestras universidades.

CONCLUSIONES

La participación entusiasta de un nutrido grupo de estudiantes, profesores e investigadores mexicanos ha permitido la identificación de una comunidad astrobiológica que ha reconocido su objeto de estudio y su público objetivo y ha sido muy creativa en la generación de actividades de investigación, docencia, divulgación y difusión de su quehacer científico durante casi 20 años. Lo anterior ha permitido la definición de líneas de investigación en las que muchos científicos mexicanos colaboran para engrandecer el acervo de conocimientos de la astrobiología, no sólo a nivel nacional sino también internacional. Se debe fortalecer la difusión de los temas centrales de la astrobiología entre los jóvenes que buscan opciones para iniciar una preparación universitaria. La generación del presente material bibliográfico coadyuvará sin duda a la consolidación de estas aspiraciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bignami, G., *et al.*, *Cosmic Vision. Space Science for Europe 2015-2025*, ESA Publications Division, Países Bajos, 2005, 109 pp.
- Cassan, A., *et al.*, “One or More Bound Planets per Milky Way Star from Microlensing Observations”, *Nature*, 481: 167, 2012.
- Chyba, C. F., y K. P. Hand, “Astrobiology: The Study of the Living Universe”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 43: 31-74, 2005.
- Des Marais, D. J., *et al.*, “The NASA Astrobiology Roadmap”, *Astrobiology*, 8(4): 715-730, 2008.
- Dick, S. J., “Exploration, Discovery, and Culture. NASA’s Role in History”, en S. J. Dick (ed.), *NASA’s First 50 Years: Historical Perspectives*, NASA, Washington, D. C., 2010, p. 759.

- Domagal-Goldman, S. D., *et al.*, “The Astrobiology Primer v2.0”, *Astrobiology*, 16(8): 561-653, 2016.
- Lederberg, J., “Exobiology: Approaches to Life Beyond the Earth”, *Science*, 132: 393-400, 1960.
- Miller, S. L., “A Production of Amino Acids under Possible Primitive Earth Conditions”, *Science*, 117: 528-529, 1953.
- Ramírez, S. I., “Las fronteras de la vida desde la perspectiva de los extremófilos”, *Inventio. La génesis de la cultura universitaria en Morelos*, 6(11): 57-66, 2010.
- Ramírez, S. I., y H. Terrazas, “Astrobiología, una nueva disciplina científica”, *Inventio. La génesis de la cultura universitaria en Morelos*, 2(3): 45-53, 2003.
- Strughold, H., *The Green and Red Planet: A Physiological Study of the Possibilities of Life on Mars*, University of New Mexico Press, Albuquerque, 1953, 107 pp.

RECURSOS ELECTRÓNICOS SUGERIDOS

1. Sociedad Mexicana de Astrobiología, en <http://www.soma.org.mx>.
2. European Astrobiology Network Association, en <http://eana-net.eu/>.
3. NASA Astrobiology Institute, en <https://nai.nasa.gov/>.
4. Astrobiology at NASA, en <https://astrobiology.nasa.gov/>.
5. Centro de Astrobiología en España, en <http://www.cab.inta.es/es/inicio>.
6. Historietas de astrobiología generadas por la NASA (textos en inglés), en <http://www.astrobio.net/nasa-astrobio-graphic-novels/>.

ACTIVIDADES DE REVISIÓN

1. Define la astrobiología con tus propias palabras.
2. ¿Quién puede ser un astrobiólogo?
3. ¿Qué hace un astrobiólogo?
4. ¿Cómo y cuándo comenzó la exploración espacial?
5. Describe cómo pueden contribuir al avance de la astrobiología los siguientes especialistas: biólogo, astrónomo, químico, geólogo, matemático, ingeniero, sacerdote, abogado, lingüista, economista.
6. Visita el sitio de internet que contiene las historietas de astrobiología de la NASA y realiza las siguientes actividades:

- a) Selecciona dos personajes de alguna de las historietas que han realizado aportaciones a la astrobiología para elaborar una pequeña biografía y explicar en qué consistió su aportación.
- b) ¿Cuáles son los objetos planetarios (planetas o satélites) relevantes para la astrobiología? Identifica tres de sus características y explícalas en un contexto astrobiológico.
- c) Describe dos misiones de exploración espacial mencionadas en las historietas e indica el nombre de la misión, el año en que se generó, su objetivo de exploración, los hallazgos realizados y la relevancia de éstos para la astrobiología.

II. EL UNIVERSO

LETICIA CARIGI*

INTRODUCCIÓN

Los aminoácidos son las estructuras básicas del ADN, formados por cinco elementos químicos sencillos (CHON-P = carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y fósforo). Esos elementos son muy abundantes en el universo, tanto así que forman parte del grupo selecto de los seis elementos químicos más comunes en la naturaleza. Estos elementos fundamentales para la vida, junto con los elementos necesarios para la formación planetaria y todos los demás elementos químicos, se han generado y continúan sintetizándose en el cosmos, en diversas etapas, zonas y tipos de estrellas. Cabe preguntar si los aminoácidos pudieron ser creados en cualquier momento de la vida del universo, si pudieron ser producidos en el gas interestelar, o si requirieron ambientes más estables, como los planetarios. En el universo existen zonas más apropiadas que otras para la formación de aminoácidos, siendo las nubes moleculares una de las más adecuadas, debido a que gozan de una diversidad química prominente. Es precisamente allí, en el interior de esas nubes, donde las estrellas y sus respectivos planetas y satélites se forman. Y en algunos planetas y satélites de este vasto universo la vida pudo haber surgido y desarrolládose.

ESCALAS DE TIEMPO

Debido a que este libro se enfoca en aspectos astronómicos, geoquímicos, químicos, biológicos y paleontológicos, es necesario ubicar en el tiempo los eventos más significativos para el campo de la astrobiología relacionados con estas ciencias, empezando desde el origen del universo hasta el día de hoy.

* Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México: <https://orcid.org/0000-0002-2023-466X>.

El universo se creó hace 13.80 mil millones de años, o 13.80 Ga (1 gaño = 1×10^9 años). Desde la tercera década del siglo pasado se sabe que el universo se expande, de manera que una galaxia, a una distancia d , se mueve a una velocidad V , dada por $V = H_0 \times d$ (Hubble, 1929), donde H_0 es la constante de Hubble. La edad del universo, t_U , está dada, de acuerdo con una primera aproximación, por el inverso de la constante de Hubble, $t_U \sim 1/H_0$.

Con base en la información obtenida de la radiación de fondo en microondas a 2.7 K, la cual permea todo el universo, de las supernovas del tipo Ia muy lejanas, de la estructura a gran escala del universo y del modelo cosmológico estándar, se ha llegado a la conclusión de que el universo se expande aceleradamente (Goldhaber, 2009). Esto implica que $t_U = 1/H_0 \times F$, con $H_0 = 67.4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} = 2.18 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ y $F = 0.951$, debido a que el universo no se ha expandido a la misma velocidad, por causa de su aceleración. Entonces, actualmente la edad del universo se estima en unos $4.36 \times 10^{17} \text{ s}$, es decir, $t_U = 13.80 \text{ Ga}$ (Planck-Collaboration *et al.*, 2018).

El Sol (véase figura II.1) se formó hace unos 4.6 Ga. A partir de modelos teóricos de evolución estelar, los cuales reproducen las propiedades observadas en estrellas en distintas etapas evolutivas, se llega a una relación entre el tiempo de vida de una estrella, t_E , su masa inicial en unidades de masa solar, M , y el contenido inicial de elementos químicos. Para abundancias químicas similares a la solar, en una primera aproximación, $t_E = t_\odot \times M^{-2.5}$, donde $t_\odot$ es el tiempo total de vida del Sol, el cual se estima en unos 10 Ga (Salaris y Cassisi, 2006).

Se ha confirmado la edad del Sol a partir de modelos teóricos que explican los frecuentes sismos observados en la superficie de esta estrella, que arrojan un valor de $4.60 \pm 0.04 \text{ Ga}$ (Houdek y Gough, 2011). La forma más conocida de obtener la edad del Sol es suponer que tanto el astro rey como el sistema solar son casi coetáneos y, por lo tanto, la edad del Sol es semejante a la que presentan los meteoritos más antiguos descubiertos hasta hoy.

El sistema solar y la Tierra se conformaron hace unos 4.54 Ga. Podemos conocer esta fecha a partir del decaimiento radioactivo de algunos isótopos presentes en meteoritos y rocas terrestres. Conociendo la concentración del isótopo hijo, D , la concentración del isótopo radiactivo padre, P , y la vida media de dicho isótopo, λ^{-1} , se puede calcular la edad de la roca, t_R , usando $t_R = \lambda^{-1} \times \ln(1 + D/P)$.

Existen varios isótopos radiactivos cuyo decaimiento permite estimar grandes escalas de tiempo. Por ejemplo, la cascada de decaimiento típica del uranio-238 al plomo-206 con $\lambda = 4.47 \text{ Ga}$. También hay decaimientos directos más comunes, como el del potasio-40 al argón-40 y calcio-40 con $\lambda = 1.25 \text{ Ga}$ y el del

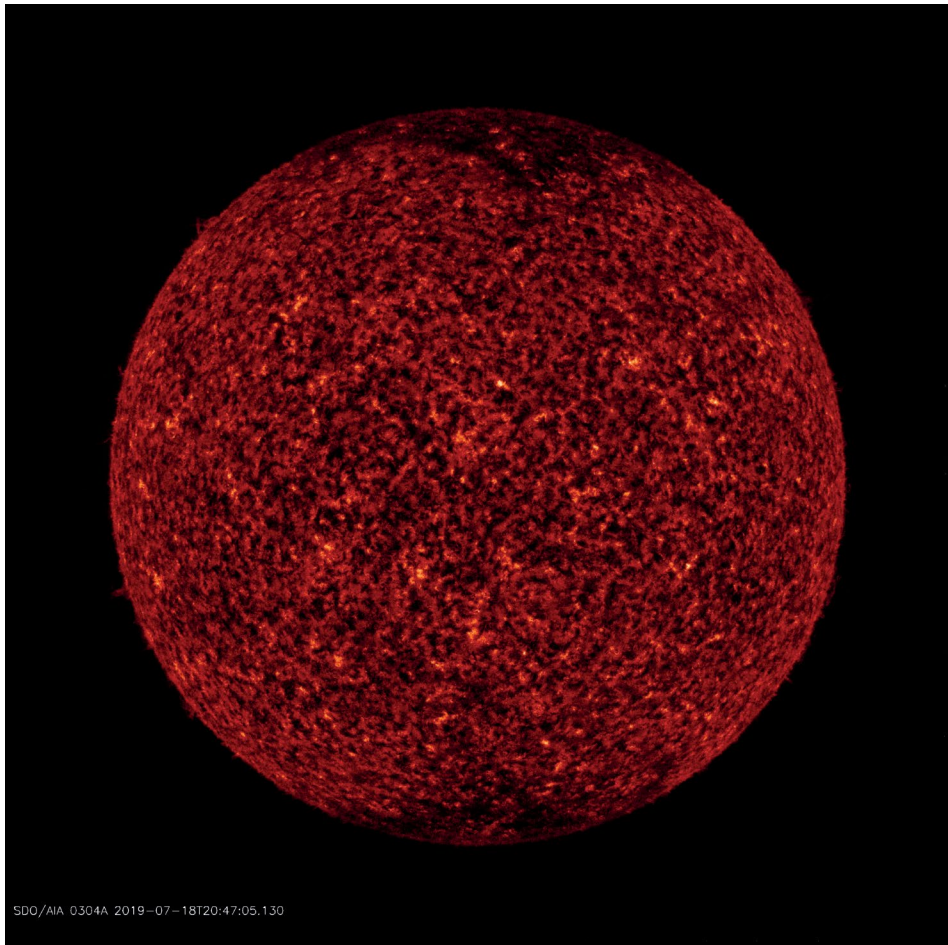


FIGURA II.1. Imagen del Sol tomada a $304\text{\AA}$ (ultravioleta extremo) por el satélite SDO (*The Solar Dynamics Observatory*). El Sol se encuentra a 8 min luz de distancia de la Tierra. Esta imagen muestra la emisión producida por iones de helio (He) calentados a 50 000 K. Las áreas más calientes se indican en blanco, mientras las más frías, en rojo oscuro. Este canal es especialmente bueno para mostrar áreas en las que se localizan columnas más densas de plasma (filamentos y prominencias) sobre la superficie visible del Sol. Muchas de estas funciones no se pueden ver o aparecen como líneas oscuras en los otros canales. Las áreas brillantes muestran lugares donde el plasma tiene una alta densidad (imagen de la NASA, SDO, AIA, EVE y HMI Science Teams).

uranio-234 al torio-230 con $\lambda = 245\,500$ años $= 2.46 \times 10^{-4}$ Ga, todos en compuestos inorgánicos. En cambio, el decaimiento del carbono-14 al nitrógeno-14 con $\lambda = 5\,730$ años $= 5.73 \times 10^{-6}$ Ga es usado en materia orgánica.

Los minerales más antiguos, zircones, se formaron hace 4.2 Ga, mientras que las rocas terrestres más antiguas datan de hace 3.98 Ga.

Se considera que los componentes de los meteoritos representan el material del cual se formó nuestro sistema planetario, pues algunos de ellos se han comportado como un sistema cerrado desde su constitución y se piensa que los planetesimos estaban formados por el material de tipo asteroidal del cual provienen los meteoritos. En cambio, las rocas terrestres proporcionan una edad menor, debido a que muchos de los productos estables se escaparon o se redistribuyeron cuando se fundieron.

La vida en la Tierra se originó hace unos 3.8 Ga, los fósiles más antiguos encontrados (de cianobacterias) datan de unos 3.5 Ga, los animales primitivos aparecieron hace unos 0.7 Ga, los primeros mamíferos surgieron unos 0.2 Ga atrás, la extinción de los dinosaurios ocurrió unos 0.065 Ga antes de la actualidad y el origen de las especies del género *Homo* aconteció hace unos 2.5 millones de años, o sea, 0.0025 Ga (¡el 0.055% de la historia de la Tierra!).

La invención de la escritura data de unos 8×10^{-6} Ga; la pirámide de Kukulcán en Chichén Itzá fue erigida en el siglo XII, hace unos 8×10^{-7} Ga; Galileo Galilei construyó el primer telescopio en 1609, hace 4×10^{-7} Ga; Albert Einstein publicó la teoría de la relatividad en 1905, hace 10^{-7} Ga y el *World Wide Web* (www), más conocido como el sistema de internet, se creó en 1989, hace 2.3×10^{-8} Ga antes de que este libro fuera publicado por primera vez.

COSMOQUÍMICA

La cosmoquímica, también llamada evolución química del universo, estudia el origen y la evolución de los elementos químicos y sus isótopos en el universo. Con el fin de investigar el origen de los elementos en la naturaleza, esta ciencia se enfoca en la producción de elementos químicos ligeros, principalmente en la Gran Explosión, y en la producción de elementos químicos pesados en el interior de las estrellas y en las explosiones de supernovas. Con el objetivo de entender la evolución de los elementos químicos, la cosmoquímica se enfoca en la cantidad y en el tipo de estrellas formadas a partir del gas interestelar, en el contexto de la formación y la evolución de las galaxias.

Si se desea analizar la evolución química del universo es necesario encontrar las diferencias y las similitudes en la composición isotópica y elemental de las estrellas y el gas presentes dentro de las galaxias y del gas existente entre las galaxias. Para eso es imprescindible conocer las abundancias de los elementos químicos y de los isótopos.

Abundancia de elementos químicos

La abundancia de un elemento químico i (o isótopo) se define como la cantidad relativa de átomos de ese elemento en una muestra dada. Existen varias maneras de expresar las abundancias químicas, las más comunes de las cuales son: por masa, por número, relativa al elemento más abundante de la muestra y relativa a las abundancias químicas que presenta el Sol.

La abundancia por masa de un determinado elemento (X_i) es la fracción por masa de ese elemento con respecto a la masa total de la muestra. En cambio, la abundancia por número de un determinado elemento (X_i) es la fracción por número de ese elemento con respecto al número total de elementos en la muestra. Debido a que el hidrógeno (H) es el elemento más abundante en el universo, algunos astrónomos expresan la abundancia de un elemento i con respecto a 10^{12} átomos de H, de manera que la abundancia viene dada en $12 + \log(X_i/H)$. Ya que el silicio (Si) es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre y en los meteoritos, los geólogos prefieren expresar la abundancia con respecto a 10^6 átomos de Si, de manera que la abundancia de un elemento i viene dada por $6 + \log(X_i/Si)$.

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra y, por lo tanto, es la estrella que mejor conocemos. Por ese motivo la astronomía usa como sistema de referencia las propiedades solares (masa, luminosidad y composición química). Los astrónomos que determinan abundancias químicas en estrellas acostumbran expresar esas abundancias relativas a los valores solares y vienen expresadas por $[X_i/H]$. $[X_i/H]$ se define como $\log(X_i/H) - \log(X_i/H)_\odot$ siendo X_i/H y $(X_i/H)_\odot$ los cocientes de la abundancia por número de un elemento X_i y del H presente en la estrella de estudio y en el Sol, respectivamente.

La composición química por masa del universo cuando se formó, hace 13.8 Ga, era 75.23% de hidrógeno, 24.77% de helio (^4He) y trazas de deuterio (^2H), ^3He y ^7Li (Peimbert *et al.*, 2007). La abundancia química por masa con la que se formó el Sol (abundancia protosolar), hace 4.6 Ga, era 71.54% de H, 27.03% de He y 1.43% de metales (todos los elementos más pesados que el He). Ese 1.43% de metales está conformado por 0.62% de oxígeno (O), 0.25% de carbono (C),

0.13% de neón (Ne), 0.14% de hierro (Fe), 0.07% de nitrógeno (N), 0.07% de silicio (Si), 0.03% de azufre (S), 0.08% de magnesio (Mg) y otros elementos en porcentajes menores (Asplund *et al.*, 2009). La composición química protosolar es ligeramente diferente a la composición química que observamos en la fotosfera del Sol, debido al asentamiento gravitacional que han sufrido el He y los metales, desde que se creó el Sol hasta el día de hoy. Las abundancias de la fotosfera por masa de H, He y metales son 73.81, 24.85 y 1.34%, respectivamente.

La nube molecular donde se creó el Sol y el sistema solar presentaba la composición química protosolar, pero los planetas del sistema solar tienen una composición química diferente: los planetas interiores son rocosos, con alto contenido de Si y Fe, y los planetas exteriores son gaseosos y líquidos, formados principalmente por H y He (véase capítulo III). La Tierra, con un contenido de metales superior a 99% de su masa, está compuesta por 33% de Fe, 30% de O, 15% de Si, 13% de Mg, 3% de S, 2% de Ni, 1.5% de Ca, 1% de Al y 1.5% de otros elementos pesados (McDonough, 2001).

Sobre el planeta Tierra actualmente domina una especie a la que se le ha llamado *Homo sapiens sapiens*, la cual tiene un contenido de metales de aproximadamente 90% (unas 60 veces más metálico que el Sol). La composición química por masa del ser humano es 65% de O, 18.5% de C, 9.5% de H, 3.2% de N y 3.8% de sales (una mezcla de calcio, fósforo, potasio, azufre, sodio, cloro, magnesio, yodo y hierro, en porcentajes que van desde 1.4 hasta 0.1%) (Chang, 2007).

No todas las estrellas de nuestra galaxia tienen la misma composición química que el Sol y, por lo tanto, los exoplanetas no necesariamente comparten de manera exacta las mismas abundancias químicas de los planetas del sistema solar. Las estrellas más viejas observadas pueden tener un contenido de metales (metalicidad) 10^{-5} veces menor que el Sol (Aguado *et al.*, 2018), lo cual dificulta la formación de planetas (véase capítulo III). Las estrellas más jóvenes presentan una metalicidad tres veces mayor que el Sol (Carigi *et al.*, 2019). Estas diferencias en composición química reflejan la evolución química de nuestra galaxia, como un ejemplo de la evolución química que se ha producido en todo el universo.

Origen de los elementos químicos: nucleosíntesis

Los seis elementos más comunes en el universo son (por orden de abundancia): hidrógeno, helio, oxígeno, carbono, neón y nitrógeno. De estos seis elementos,

cuatro son elementos biogénicos básicos (CHON; véase capítulo VI), lo que implica que existe suficiente material en el universo para crear vida. Esa riqueza cósmica de elementos biogénicos no necesariamente conlleva la proliferación de vida en el universo, ya que el origen y la evolución de la vida dependen de otros factores, aún desconocidos (véase capítulo VII).

Los seis elementos más abundantes, junto con los demás 92 elementos naturales de la tabla periódica, se observan en diferentes proporciones en los objetos del universo, sean planetas, estrellas, gas interestelar o gas intergaláctico.

La gran mayoría de los “núcleos de los átomos” se han formado en los primeros cuatro minutos después de la Gran Explosión, en el interior de las estrellas y en las explosiones estelares (supernovas), donde la temperatura y la densidad son lo suficientemente elevadas para provocar las reacciones termonucleares. En zonas más frías de las estrellas y del medio interestelar, los núcleos capturan a los electrones para formar los átomos.

La creación de elementos químicos en el universo temprano se llama “nucleosíntesis primigenia”. En el primer segundo después de la Gran Explosión comenzaron a formarse los elementos, principalmente hidrógeno (^1H o protón) y deuterio (^2H o D). El deuterio producido se destruía, ya que la temperatura era muy elevada ($\sim 10^{10}$ K). El universo continuó su expansión, la temperatura del mismo disminuyó y el D sobrevivió a los 10 segundos ($\sim 3 \times 10^9$ K), dando origen a otros elementos ligeros. Después de los 100 segundos ($\sim 10^9$ K) se produjo ^3He , ^4He , ^7Be y ^7Li . A los cuatro minutos ($\sim 8 \times 10^8$ K) la producción de elementos declinó y a los 17 minutos ($\sim 4 \times 10^8$ K) las reacciones nucleares terminaron por completo, ya que las barreras coulombianas de los núcleos son más fuertes que su energía térmica. Luego, la mayoría del ^7Be decayó a ^7Li y 100 000 años después la radiación dejó de interactuar con la materia, logrando unirse los electrones a los núcleos y formando los primeros átomos (Steigman, 2011).

La masa bariónica del universo temprano estaba formada por 75% de H, 25% de ^4He y trazas de D, ^3He y ^7Li . El universo siguió expandiéndose y enfriándose, pero manteniendo invariante su composición química hasta que se formaron las primeras estrellas, unos 200 millones de años después de la Gran Explosión (Richard *et al.*, 2011).

En una nube de gas contrayéndose se creará una estrella si el centro de la nube contraída alcanza una temperatura aproximada de 1 a 2×10^7 K. Así se inicia la “nucleosíntesis estelar”, con la fusión de cuatro núcleos de H para formar un núcleo de He. Es importante mencionar que el H es el combustible principal

en las estrellas y, por lo tanto, se ha estado consumiendo, después su formación durante la Gran Explosión.

Las estrellas se forman con masas muy variadas entre 0.1 y 100 masas solares, aproximadamente ($1 \text{ masa solar} = 1 M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$). La evolución estelar depende de la masa inicial de la estrella, principalmente del contenido de elementos pesados y de la proximidad de otra estrella, estas últimas de manera secundaria. En este capítulo se llamarán “estrellas de baja masa” a aquellas con masas menores a unas $8 M_{\odot}$, y “estrellas masivas” a aquellas con masas mayores a $8 M_{\odot}$. Cabe señalar que la masa límite para que una estrella sea considerada de baja o alta masa se determina por la etapa final de la estrella. Si una estrella muere como nebulosa planetaria, será considerada estrella de baja masa; en cambio, si muere como supernova del tipo II, será etiquetada como estrella masiva.

A continuación nos enfocaremos en la nucleosíntesis estelar de los elementos más pesados que el He, ya que ellos son importantes para el origen de planetas tipo terrestre (elementos geoquímicos, como O, Si, Mg y Fe) y de la vida (cinco de los seis elementos biogénicos, CONSP).

Las “estrellas de baja masa” producen principalmente He, C y N, los cuales son expulsados al medio interestelar por medio de vientos estelares y durante la etapa final de la estrella, llamada nebulosa planetaria (véase figura 11.2). En el centro de la nebulosa planetaria queda el núcleo desnudo de la estrella, como un cadáver estelar, llamado enana blanca, con masas menores a $1.4 M_{\odot}$ y radios del orden del radio de la Tierra ($r_{\oplus} = 6.37 \times 10^6 \text{ m}$).

Si la estrella tiene metalicidad inicial baja, la producción de ^4He se lleva a cabo en el centro estelar a través de una de las tres cadenas protón-protón (dependiendo de la masa estelar): un conjunto de tres a cuatro reacciones nucleares que involucran H, He, Li, Be y B (en forma elemental e isótopos). Pero si la estrella tiene metalicidad alta y masa mayor a $2 M_{\odot}$, la generación de ^4He se realiza a través del ciclo CNO: un conjunto de una decena de reacciones nucleares entre C, N y O (en forma elemental e isótopos). En este ciclo, 98% de los núcleos de C y O se convierten en ^{14}N .

Cuando todo el H del núcleo estelar se ha convertido en He, el centro de la estrella se contrae y se calienta hasta una temperatura de $\sim 2 \times 10^8 \text{ K}$. A esta temperatura comienza la reacción triple-alfa (un par de partículas α se fusionan y el producto se une con una tercera partícula α) para formar un núcleo de ^{12}C (1 partícula $\alpha = 1$ núcleo de ^4He).

Las “estrellas masivas” producen la mayoría de los elementos químicos (excepto el H, el cual se consume en todas las estrellas) y su producción nucleosinté-



FIGURA II.2. *La nebulosa planetaria de la Mancuerna. Algunas veces llamada nebulosa de la Manzana. Se encuentra ubicada a unos 1300 años luz de distancia. Fotografía obtenida con el telescopio de 84 cm del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir. Instituto de Astronomía, UNAM (imagen de F. Guillén).*

tica se realiza en dos periodos: desde su nacimiento hasta la etapa de presupernova (en el interior estelar) y en los últimos segundos de vida (en la etapa de supernova). Los elementos generados son expulsados al medio interestelar con los vientos estelares (más importantes mientras más metálica sea la estrella) y cuando estas estrellas terminan su vida como supernovas del tipo II (véase figura II.3). El núcleo desnudo de la estrella se convierte en una estrella de neutrones si la masa de ese cadáver estelar está entre 1.4 y $3 M_{\odot}$. En cambio, el cadáver será un hoyo negro si el núcleo tiene una masa mayor a $3 M_{\odot}$.

En estas estrellas masivas, la generación de He, C y N se realiza por medio de reacciones nucleares similares a las explicadas para las estrellas de baja masa. El ^{16}O , el elemento pesado más abundante en el universo, es sintetizado en su mayoría por estas estrellas al fusionar ^{12}C con una partícula α . El ^{20}Ne , el quinto elemento más abundante en el cosmos, es producido a partir de ^{12}C en una reacción triple α .

Las fases de combustión en el interior estelar forman una estructura de “capa de cebolla”, de manera que se fusionan elementos más pesados a radios estelares menores. A una temperatura de alrededor de 5 a 8×10^8 K se realiza la fusión de dos núcleos de ^{12}C para formar ^{23}Na , ^{20}Ne y principalmente ^{24}Mg . Cuando la temperatura es $\sim 1.4 \times 10^9$ K, se lleva a cabo la combustión de dos núcleos de ^{16}O para sintetizar ^{32}Si , ^{31}P , ^{24}Mg y, especialmente, ^{28}Si . En el intervalo aproximado de 3 a 5×10^9 K los núcleos “semilla” de ^{24}Mg y ^{28}Si se fusionan con partículas α sintetizando ^{36}Ar , ^{40}Ca , ^{44}Sc , ^{48}Ti , ^{52}Cr y, principalmente, ^{56}Ni , el cual decae a ^{56}Fe .

A temperaturas mayores de 5×10^9 K, el ^{56}Fe se fotodesintegra a 13 núcleos de ^4He . Esta reacción es endotérmica (consume energía en vez de producirla): el radio del núcleo estelar se contrae por efecto de la gravedad de unos 1000 km a 1 km, aproximadamente, en el lapso de milisegundos, creándose una espectacular supernova. En el borde del núcleo colapsado se forma una onda de choque que se dirige hacia fuera, propagándose a través de la envolvente estelar, aumentando la temperatura de las capas externas de esa envolvente hasta temperaturas de fusión nuclear y generando combustión termonuclear violenta, llamada “nucleosíntesis explosiva”. Los principales productos de esta nucleosíntesis son isótopos y elementos de Al, Si, S, Cl, Ar, Ca, Ti, Cr y Fe.

Si dos estrellas muy cercanas entre sí intercambian material, puede llevarse a cabo la “nucleosíntesis en sistemas binarios en contacto”. Los sistemas binarios estelares más importantes son los progenitores de las supernovas del tipo Ia (SNIa) (véase figura II.4). Estos sistemas están formados por dos estrellas de

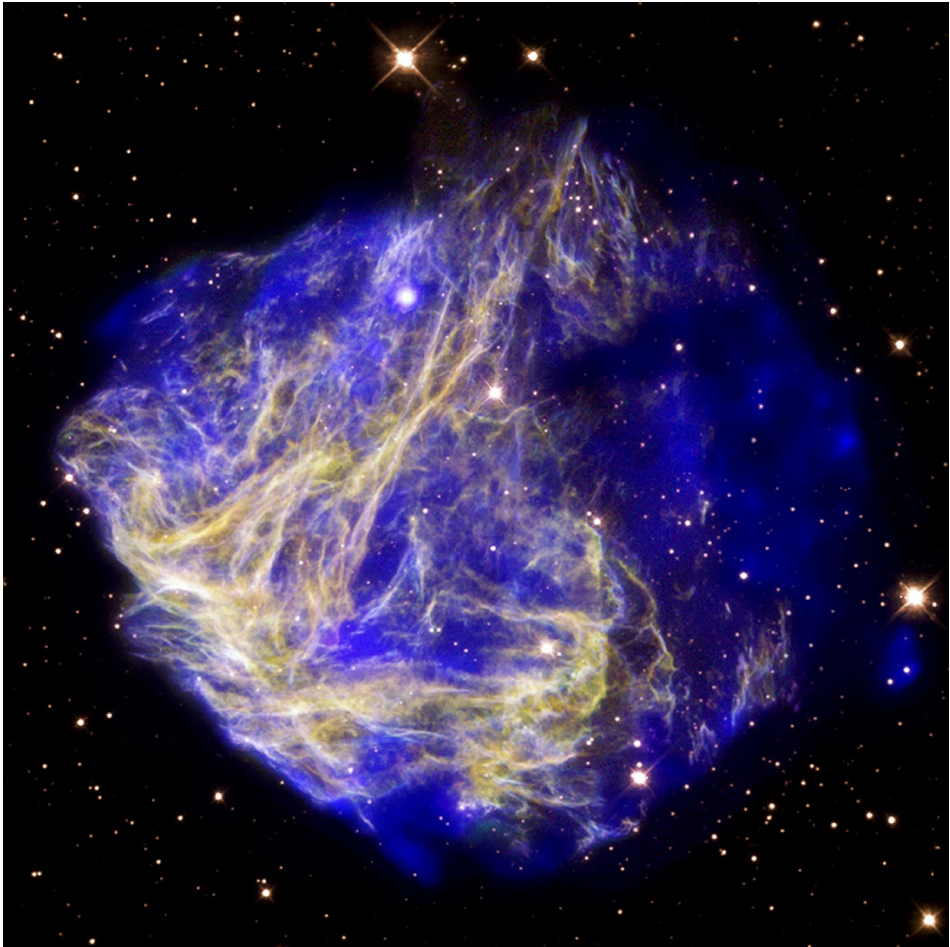


FIGURA II.3. Remanente de la supernova (SN) del tipo II, N49. Este remanente altamente asimétrico se localiza en la Gran Nube de Magallanes, una galaxia irregular, satélite de la Vía Láctea, que se observa desde el hemisferio sur. Se encuentra a unos 160 000 años luz y, con base en los datos de rayos X (azul), la imagen corresponde a unos 5 000 años luz después de la explosión. Se estima que la energía liberada en el estallido fue el doble de una SN promedio. Los filamentos brillantes en el óptico (amarillo) indican interacciones entre la onda de choque generada por la SN y el gas molecular denso y frío cercano al estallido (Bilikova et al., 2007) (imagen de la NASA, CXC, Penn State y S. Park et al. [rayos X] y NASA, STSCI, UIUC, Y. H. Chu y R. Williams et al. [óptico]).

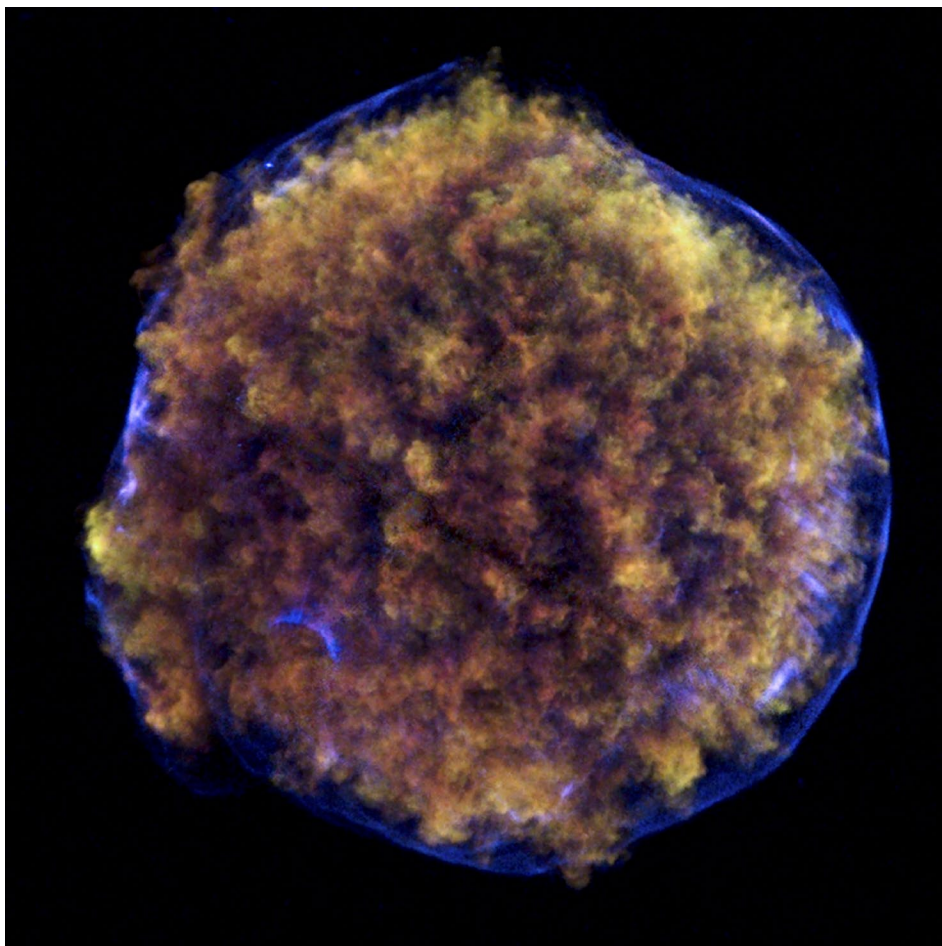


FIGURA II.4. Remanente de la supernova Tycho, supernova del tipo Ia. Esta SNIA se encuentra a 13 000 años luz de la Tierra. Fue observada por primera vez en 1572 por el astrónomo danés Tycho Brahe. En rojo y amarillo se muestra la emisión en rayos x de baja (1.6-2.0 keV) y mediana energía (2.2-2.6 keV), respectivamente, provenientes del material eyectado por la explosión de supernova. En azul se presenta la emisión en rayos x de alta energía (4-6 keV) procedente de la onda de choque (Lu et al., 2011) (imagen de la NASA, CXC y Lu et al. [2011] de la Academia China de Ciencias).

baja masa (las cuales individualmente producirían He, C y N) que como pareja interactuante producen elementos tan pesados como Si, Ar, Ca, Ti, O, Ne, Mg y S (en menor proporción que una estrella masiva) y principalmente ^{56}Fe ($\sim 0.8 M_{\odot}$, cantidad cinco a 11 veces mayor que aquella producida por una SN de origen masivo).

La estrella más masiva del sistema binario evoluciona más rápido, convirtiéndose en una enana blanca de C y O (véase evolución de una estrella de baja masa en esta misma subsección). La estrella menos masiva evoluciona con más lentitud, aumenta su tamaño y parte de su material es atrapado gravitacionalmente por la enana blanca. La masa de la enana blanca se incrementa, la temperatura de su interior aumenta hasta $\sim 5 \times 10^8$ K y la reacción $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ comienza. Esta combustión es explosiva; el frente de choque se propaga desde el interior al exterior de la enana blanca, produciendo ^{56}Ni que se desintegra en ^{56}Co y ^{56}Fe en el centro de la estrella y elementos más livianos a radios estelares mayores.

La formación de elementos con número másico alto (número másico = número de neutrones + número de protones), es decir, mayor que 65, requiere temperaturas mayores a 5 y 6×10^9 K. A esas temperaturas es más probable la fotodesintegración que la fusión de elementos. Por lo tanto, la síntesis de núcleos muy pesados se realiza generalmente a partir de un núcleo semilla de ^{56}Fe que captura neutrones, debido a que este proceso no depende de la barrera coulombiana. Dependiendo del tiempo de vida de un núcleo frente a la captura de neutrones (τ_n), se han reconocido dos tipos de procesos de captura de neutrones: procesos “s” (con $\tau_n > 10$ años y un flujo 10^8 neutrones cm^{-3}) y procesos “r” (con $\tau_n \sim 1$ segundos y un flujo $> 10^{20}$ neutrones cm^{-3}).

La mayoría de los elementos “s” se genera en las últimas etapas de las estrellas de baja masa y uno de sus productos más pesados es el plomo. Los elementos “r” se crean en explosiones de supernovas de tipo II y en kilonovas (producto de la fusión de dos estrellas de neutrones o de una estrella de neutrón y un agujero negro) y sintetizan elementos como el oro, el platino y el plutonio. Varios de los elementos más pesados que el Fe parecen provenir de una combinación de captura neutrones “s” y “r”, llamados elementos “i” por algunos, y su origen astrofísico aún es desconocido (Kajino *et al.*, 2019).

El cuadro II.1 muestra la aportación de la Gran Explosión y de los diferentes tipos de estrellas a las abundancias actuales de los principales elementos biogénicos (C, H, O, N, S, P) y geoquímicos (Fe, O, Si, Mg).

CUADRO II.1. *Origen cósmico de los principales elementos biogénicos y geoquímicos. Las contribuciones están dadas en porcentajes*

<i>Elemento químico</i>	<i>Gran Explosión</i>	<i>Estrellas masivas</i>	<i>Estrellas de baja masa</i>	<i>Supernovas tipo Ia</i>
C	0	48	50	2
H	100	0	0	0
O	0	96	2	2
N	0	30	70	0
S	0	60	0	40
P	0	95	0	5
Fe	0	30	0	70
Si	0	65	0	35
Mg	0	98	0	2

FUENTE: datos tomados de Carigi *et al.*, 2005, Delgado-Inglada *et al.*, 2015, Fernández-Alvar *et al.*, 2018, y Jennifer Johnson (<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~jaj/nucleo/index.html>).

Evolución de los elementos químicos en el universo

En la sección anterior se presentó una visión general del origen cósmico de los elementos químicos: el H y el He fueron producidos durante la Gran Explosión y una menor proporción del He y de todos los elementos más pesados que el helio han sido generados por las estrellas en diferentes proporciones, dependiendo del tipo de estrella.

Las estrellas al morir eyectan sus productos químicos al medio interestelar, mezclándose con éste y enriqueciéndolo con He y metales. De este gas contaminado se constituye la siguiente generación estelar con un contenido mayor de He y de metales que la generación anterior. Cuando el gas tiene una abundancia de metales de $1/2$ a $8/4$ de la metalicidad solar ($Z_{\odot} \sim 1.4\%$), la probabilidad de crearse en él estrellas con planetas tipo Tierra y Supertierra es mayor. A metalicidades más bajas que $1/2 Z_{\odot}$ la probabilidad de que se forme ese tipo de planetas es reducida (véase capítulo XII), especialmente si el contenido de elementos geoquímicos es bajo.

Si se desea inferir químicamente la formación de planetas tipo terrestre en un grupo de estrellas localizado en una zona del universo, se requiere que el medio interestelar donde las estrellas se formaron presente abundancias de elementos

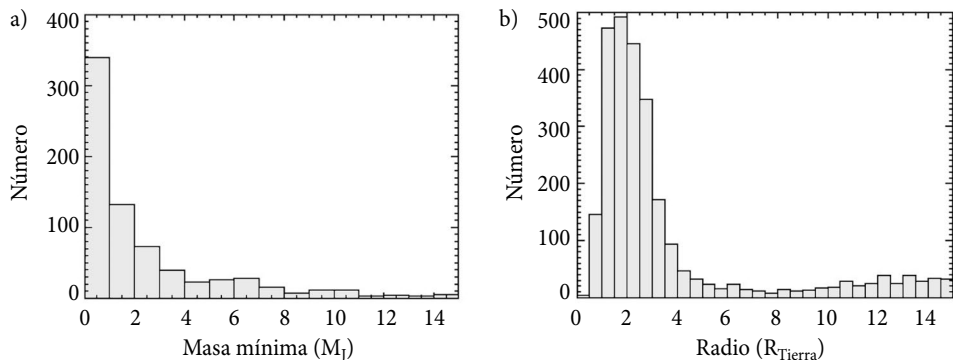


FIGURA 11.5. Concepción artística de nuestra galaxia. La Vía Láctea es una galaxia espiral de unos 80 000 años luz de radio y presenta dos brazos espirales principales (Perseo y Escudo de Centauro), los cuales emergen de los extremos de la barra central galáctica. Se indica la posición del Sol, a unos 25 000 años luz del centro de la galaxia (imagen de la NASA, R. Hurt [Spitzer Science Center] y JPL-Caltech).

pesados relativamente altas. Por lo tanto, se necesita inferir la cantidad de gas con que se formó esa vecindad estelar en estudio y el número y el tipo de estrellas que murieron antes de la formación de las mencionadas estrellas.

Haciendo uso de un símil culinario, se podría decir que las estrellas y sus respectivos planetas se han formado de una “sopa gaseosa” (medio interestelar) cuyo “sabor” (composición química) depende de la cantidad de agua (H y He) y de la proporción y el tipo de “condimentos” (cantidad de elementos más pesados que el He, sintetizados en los núcleos estelares y eyectados por las estrellas al morir) empleados en su preparación. Veamos cómo esa “sopa” ha evolucionado con el transcurso del tiempo.

Hace 13.8 Ga el material bariónico del universo estaba constituido por un gas de H y He (gas primigenio). En ese gas se crearon las primeras estrellas, estrellas masivas cuyas propiedades no se conocen con precisión. Las primeras generaciones de estas estrellas enriquecieron el gas primigenio, principalmente con C, N y O. En el momento en que la metalicidad del medio interestelar alcanza unas milésimas de la metalicidad solar, cuando el universo tenía unos 10^8 años (10^{-1} Ga), se formaron las primeras generaciones estelares completas, esto es, generaciones conformadas tanto por estrellas de baja masa como por estrellas de alta masa.

No obstante, el número de cada tipo de estrella formada depende de la masa inicial de la estrella. En un brote de formación estelar, la naturaleza favorece la formación de estrellas de baja masa, creando, por cada una de las estrellas masi-

vas, 20 estrellas de baja masa y unas 200 estrellas de muy baja masa (menos masivas que el Sol), aproximadamente. Sin embargo, las estrellas de una generación estelar enriquecen el medio interestelar a distintos tiempos, dependiendo del tiempo de vida de cada estrella. En una generación estelar las primeras estrellas en morir son las estrellas masivas, ya que sus tiempos de vida son muy cortos relativos a la edad del universo, entre 10^6 y 10^7 años (10^{-3} - 10^{-2} Ga); después mueren las estrellas de baja masa, con tiempos de vida entre 10^8 y 10^{10} años (10^{-1} - 10^{+1} Ga), siendo más longevas aquellas con menor masa estelar.

La formación estelar continuó y las estrellas fueron enriqueciendo el medio interestelar con diferentes elementos químicos, dependiendo del tiempo de vida de las estrellas que los producen, la cantidad de elementos que genera cada estrella, el número total de estrellas formadas y el número relativo entre tipos de estrellas. De esta forma, cuando el universo tenía 9.2 Ga, se crearon el Sol y el sistema solar a partir de una nube gaseosa que contenía elementos primigenios y productos químicos de muchas estrellas difuntas. La Tierra y los seres vivos sobre ella están formados por esos elementos. La evolución química en la vecindad solar prosiguió, principalmente gracias a los eventos de SNS y nebulosas planetarias que han acontecido en los últimos 4.6 Ga, de manera que el medio interestelar actual del entorno solar tiene un contenido de metales de 1.9%, 1.4 veces mayor que el que posee el Sol.

Cabe destacar que no todas las zonas del universo han tenido la misma evolución química que la vecindad solar. En nuestra propia galaxia, la Vía Láctea (véase figura 11.5) las zonas centrales se han beneficiado con una formación estelar más vigorosa, más breve y antigua que las zonas exteriores, debido a que las partes internas se ensamblaron más rápido y con mayor cantidad de gas. Esta disimilitud en la formación de nuestra galaxia originó el gradiente químico observado en el disco galáctico, de manera que las zonas centrales tienen un contenido de metales unas tres veces mayor que el solar, mientras que las partes externas presentan una metalicidad 10 veces menor que la solar. El gradiente químico y la historia de formación estelar son factores determinantes para el cálculo de las zonas habitables galácticas (véase capítulo XII).

En el universo hay diferentes tipos de galaxias: elípticas, espirales, irregulares y enanas, con masas bariónicas entre 2000 y 10^{-5} veces la masa contenida en gas y estrellas en nuestra galaxia ($M_{VL} \sim 7 \times 10^{10} M_{\odot}$) y metalicidades entre 10 y $10^{-4} Z_{\odot}$, respectivamente (McMillan, 2011). Cada una con diferente historia de formación galáctica y de formación estelar, lo que implica una diferente evolución química y, por tanto, una zona habitable particular en cada galaxia.



FIGURA II.6. La nebulosa de Carina. Situada a 7500 años luz de distancia, presenta este pilar de gas y polvo de unos tres años luz de longitud. En el interior se están formando estrellas que desprenden chorros de gas perpendiculares a los discos estelares, probablemente progenitores de discos protoplanetarios (véase figura II.8). Los colores corresponden al oxígeno (azul), al hidrógeno y nitrógeno (verde) y al azufre (rojo) (imagen de la NASA, ESA, M. Livio y the Hubble 20th Anniversary Team [STScI]).

MEDIO INTERESTELAR

Como se mencionó al final de la sección anterior, la masa bariónica de la Vía Láctea es de unos $7 \times 10^{10} M_{\odot}$. El 85% de esa masa está formada por estrellas y el espacio entre estrellas está lleno de gas (14%) y de partículas de polvo (1%). En nuestra galaxia, el medio interestelar ocupa casi el 100% del volumen galáctico, ya que, en promedio, existe una estrella por cada año luz cúbico y el radio de las estrellas más

comunes es de 10^{-7} año luz (1 año luz = 9.5×10^{12} km). El medio interestelar es altamente heterogéneo y se presenta en tres formas: neutro, ionizado y molecular.

El gas molecular tiene temperaturas de 10 a 30 K, densidades desde 100 hasta 10^6 átomos por cm^3 , contiene aproximadamente 49% de la masa gaseosa de la galaxia y ocupa menos de 1% del volumen de ésta. El gas neutro presenta temperaturas desde 50 hasta 10^4 K, densidades entre 0.2 y 50 átomos por cm^3 , contiene aproximadamente 50% de la masa gaseosa de nuestra galaxia y ocupa 20% de su volumen. El gas ionizado tiene temperaturas entre 5×10^3 y 10^7 K, densidades desde 10^{-4} hasta 10^4 átomos por cm^3 , contiene 1% de la masa gaseosa galáctica y ocupa 80% del volumen de la Vía Láctea (McKee y Ostriker, 1977; Ferrière, 2001).

Moléculas en el gas interestelar

La mayor parte de las moléculas han sido detectadas en nubes oscuras frías, nubes oscuras calientes y envolturas circunestelares. Las nubes moleculares (véase figura 11.6) están compuestas principalmente por H_2 , con trazas de otras moléculas, como CO, NH_3 , H_2O , entre otras. La molécula más compleja (C_{70}) fue observada en una nebulosa planetaria (Cami *et al.*, 2010), aunque se necesita confirmar el hallazgo. El número de moléculas detectadas se ha disparado desde la década de 1970, con el avance en los telescopios construidos específicamente para detectar ondas electromagnéticas fuera del visible, como son los radiotelescopios y los telescopios milimétricos e infrarrojos. Para una lista actualizada de moléculas en el espacio, véase *The Cologne Database for Molecular Spectroscopy* (<https://zeus.ph1.uni-koeln.de/cdms/molecules>).

De las 200 moléculas detectadas en el medio interestelar, la mayoría son compuestos orgánicos, exhiben gran cantidad de radicales, haciendo que las moléculas no sean neutras, y presentan alto grado de insaturación (alto número de dobles enlaces por molécula), mostrando que la química del medio interestelar es muy distinta a la terrestre, debido a que las condiciones físicas son muy diferentes. En la Tierra, las moléculas se forman comúnmente por reacciones ternarias. En estas reacciones primero se unen dos átomos formando un compuesto inestable cuyo tiempo de vida está entre 10^{-14} y 10^{-3} s. El tercer átomo debe unirse al compuesto inestable rápidamente para formar la molécula. Estas reacciones no pueden llevarse a cabo en el gas interestelar, ya que éste presenta bajas temperaturas y reducidas densidades, haciendo que las colisiones entre átomos se den a tiempos muchos mayores que 10^{-3} s.

La formación de moléculas en el medio interestelar se realiza en nubes moleculares, a través de reacciones en estado gaseoso y en la superficie de los granos de polvo:

- a) Las reacciones en fase gaseosa pueden ocurrir entre partículas neutras o entre iones y moléculas:
 - i) Las reacciones entre partículas neutras son importantes en frentes de choque y núcleos calientes dentro de las nubes, donde la temperatura es del orden de 100 K. El producto de estas reacciones explica la alta abundancia detectada de OH, H₂O, SiO, SO y SO₂. Estas reacciones son menos importantes en zonas más frías (con temperaturas de aproximadamente 10 K), ya que son demasiado lentas. Sin embargo, los productos generados a estas bajas temperaturas explican las abundancias observadas de algunas moléculas, como el CH.
 - ii) Las reacciones entre iones y moléculas pueden generarse incluso a bajas temperaturas. Los iones (generalmente positivos) son producidos cuando un rayo cósmico incide sobre una molécula y este ion es atraído por los electrones de una molécula neutra, generando moléculas más pesadas. Este mecanismo es el responsable de la mayor parte de las moléculas de tamaño intermedio, como OH, H₂O, CH₃OH y C₂H₂.
- b) Las reacciones en la superficie de granos de polvo explican la formación de la molécula más abundante, H₂, y de moléculas complejas, como (CH₃)₂CO.

La presencia de granos de polvo favorece la formación de moléculas y facilita su supervivencia, ya que las moléculas se pueden formar a altas densidades y a bajas temperaturas y son fácilmente destruidas por agentes externos.

La formación de hidrógeno (H₂) es un problema importante en la cosmoquímica. Esta molécula necesita ser generada continuamente, ya que es destruida por diferentes agentes: fotones ultravioleta (UV), rayos cósmicos, choques y reacciones químicas. Por más de un cuarto de siglo, el modelo más exitoso predijo la formación de una molécula de H₂ usando como catalizador un grano de polvo, el cual absorbe el exceso de energía de la reacción. Algunos detalles del mecanismo aún no están del todo claros, como son la eficiencia de la recombinación, la movilidad y la interacción de los átomos de H sobre y con la superficie, entre otros (Vidali *et al.*, 2005).

Los granos de polvo están constituidos por un núcleo y un manto; el núcleo se forma en las estrellas y el manto en la nube molecular (véase la siguiente sec-

ción: “Polvo en el medio interestelar”). Los mantos de los granos sufren reacciones en su superficie y generan una buena parte de los compuestos moleculares más complejos. En condiciones normales de nubes moleculares, todas las moléculas deberían quedar adheridas en $\sim 10^5$ años, pero esto no sucede debido a evaporación, colisiones entre granos, reacciones explosivas en la superficie de los granos, radiación UV y frentes de choque.

La radiación UV de las estrellas que nacen en las nubes es uno de los factores más importantes para detener el crecimiento de los granos, ya que transforma los compuestos y los evapora de la superficie de los granos de polvo. De esta manera, aparecen cantidades importantes de CO_2 , H_2CO , HCO , OCN^- , NH_3 , CH_3OH y otros compuestos saturados en los núcleos calientes dentro de las nubes moleculares. Según algunos modelos teóricos, los residuos orgánicos adheridos después de la evaporación de los hielos pueden ser grandes compuestos orgánicos e, inclusive, precursores prebióticos (López-Sepulcre *et al.*, 2019), pudiendo tener implicaciones en la comprensión del origen de la vida.

Es bien sabido que los aminoácidos constituyen las unidades estructurales de las proteínas y del ADN en los seres vivos. Observacionalmente, aún no tenemos evidencias de aminoácidos en el medio interestelar, a pesar de que en los últimos años se ha buscado el más simple de ellos (la glicina, $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$). En 2003, Kuan *et al.* anunciaron la detección de glicina interestelar en núcleos moleculares calientes de tres regiones estelares en formación, pero en 2005 Snyder y su grupo refutaron el hallazgo (Kuan *et al.*, 2003; Snyder *et al.*, 2005).

El descubrimiento de moléculas en el espacio no es tarea fácil, debido a diferentes obstáculos observacionales y teóricos. Mientras más grande es la molécula, presenta más cantidad de líneas espectrales, cada una con menor energía, dificultando por lo tanto su detección. De esta manera, en el medio interestelar será más sencillo localizar moléculas simples que complejas, aunque ambos tipos de moléculas tengan la misma abundancia. Nuevos telescopios capaces de detectar líneas espectrales moleculares débiles, y, por ende, de revelar moléculas complejas, ya están en operación. Un ejemplo es el GTM, el Gran Telescopio Milimétrico, localizado en lo alto del volcán Sierra Negra, en Puebla, México.

Por otro lado, la mayoría de las líneas moleculares de los espectros que estamos observando son desconocidas. Se requiere un esfuerzo multi e interdisciplinario entre astrónomos, físicos y químicos, teóricos y experimentales, para determinar los espectros moleculares observados con telescopios en diferentes longitudes de onda (infrarrojo, submilimétrico, milimétrico y radio) y compararlos con los espectros obtenidos en el laboratorio.

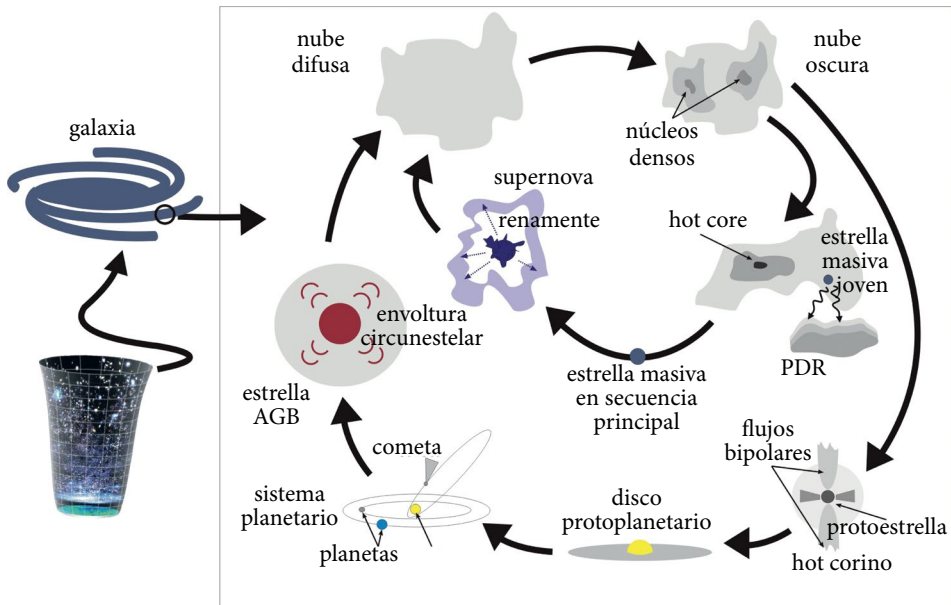


FIGURA II.7. Ciclo de vida del gas y el polvo en el universo molecular. Este ciclo del medio interestelar está ligado a la evolución estelar y a la formación de sistemas planetarios. En una nube difusa se encuentran los elementos químicos en estado gaseoso y formando granos de polvo. Dentro de esa nube oscura puede haber zonas más densas donde se forman estrellas de diferentes masas. Las estrellas masivas, al evolucionar y morir, como supernova, producen elementos químicos que se incorporan a la nube y también destruyen los granos de polvo. Las estrellas de baja masa, en estados iniciales de formación, presentan flujos bipolares (chorros de gas) y un disco circunestelar. Ese disco puede ser protoplanetario si se crean planetas en él, gracias a la presencia de partículas de polvo, entre otros factores. Los cometas y los meteoritos también contienen esos granos de polvo presentes en el material protoplanetario. Cuando las estrellas de baja masa evolucionan, generan elementos químicos en su centro y además forman nuevos granos de polvo en las envolturas circunestelares que alimentarán los discos circunestelares de futuras estrellas. Todo ese material se eyecta al medio interestelar que cuando se enfría forma una nube oscura donde se formará otra generación estelar (Agúndez, 2009) (imagen de M. Agúndez).

Polvo en el medio interestelar

Una partícula de polvo interestelar es un grano sólido de al menos 0.1 micras ($1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-3} \text{ mm}$) de diámetro, aproximadamente, conformado por un núcleo y un



FIGURA II.8. Seis discos protoplanetarios alrededor de embriones estelares ubicados en la Nebulosa de Orión, a unos 1500 años luz de distancia de la Tierra. En cada recuadro se puede apreciar el capullo de gas y polvo que protege a los posibles planetas en formación. Los capullos están siendo parcialmente evaporados por la violenta radiación ultravioleta externa proveniente de las estrellas masivas en la nebulosa. Granos de polvo y moléculas están presentes en los discos (imagen de la NASA, ESA, M. Roberto [STScI/ESA], HST Orion Treasury Project Team y L. Ricci [ESO]).

manto. El núcleo se forma por condensación en las envolturas frías de estrellas de baja y alta masa durante etapas de eyección de material estelar (por ejemplo, novas, supernovas, vientos de Wolf-Rayet y de gigantes rojas). El núcleo está compuesto por silicatos, diamantes, grafito, carbono amorfo o cristalino, carbono hidrogenado amorfo e hidrocarburos en cadenas. Cuando esos núcleos son eyectados por las estrellas al medio interestelar, para luego formar parte de una nube molecular, adhieren hielos de diferentes compuestos, creándose un manto sobre el núcleo. Este manto tiene al menos dos capas: la primera formada por hielos de H_2O , CH_4 y NH_3 , y la segunda compuesta por hielos de CO , CO_2 , O_2 , N_2 y CH_3OH (Agúndez, 2009).

Los granos de polvo más pequeños son los PAH (hidrocarburos policíclicos aromáticos), los cuales son moléculas planas formadas por anillos de benceno (C_6H_6) fusionados. Se encuentran en el medio interestelar, en los meteoritos y en

los cometas del sistema solar y podrían ser la base de las moléculas prebióticas que originaron las primeras células.

Los granos de polvo absorben la luz visible, extinguiéndola y oscureciendo la zona donde se encuentran. Por esa razón las nubes moleculares con alto contenido de polvo se aprecian oscuras. En el sistema solar, específicamente en los asteroides y en el polvo interplanetario, se encuentran granos de polvo que formaban parte de la nube progenitora de ese sistema. Estas partículas, llamadas granos o polvo presolar, fueron generadas en algunas estrellas de baja masa que murieron antes de la formación del Sol y el sistema solar. Los granos presolares tienen una composición isotópica típica de reacciones nucleares estelares. El polvo presolar está formado por diamantes, grafitos, silicatos, SiC , Si_3N_4 , Al_2O_3 , MgAl_2O_4 , $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$, TiO_2 , $\text{Mg}(\text{Cr},\text{Al})_2\text{O}_4$, entre otros.

La figura 11.7 muestra el ciclo de vida del gas y el polvo, desde la formación de granos dentro de las envolturas circunestelares de estrellas evolucionadas (estrellas AGB), pasando por las diferentes etapas del polvo en el medio interestelar y la formación de estrellas y planetas a partir del gas, hasta la incorporación de los granos en los planetas que orbitan estrellas, las cuales, al evolucionar, generan las envolturas circunestelares.

La cantidad y la composición química del polvo tiene efectos en la formación de estrellas y de sus discos planetarios (véase figura 11.8), pero estamos lejos de conocer cuáles son las propiedades físicas y químicas del gas y del polvo en los discos circunestelares que promueven la formación planetaria, y más distantes aún de entender las condiciones químicas para el surgimiento de vida sobre los planetas (véase capítulo VII).

CONCLUSIONES

La zona de nuestra galaxia donde nos encontramos requirió casi $2/3$ de la edad del universo con el fin de acumular suficientes elementos químicos pesados para la formación de los planetas del sistema solar. Sobre el tercer planeta de ese sistema, la Tierra, la vida unicelular surgió muy rápidamente después de su formación, alrededor de $1/15$ veces la edad del universo. Sin embargo, para que se desarrollara un ser vivo complejo y tecnológicamente comunicativo (el ser humano) la naturaleza necesitó el $1/3$ restante de la edad del universo.

No obstante, en zonas centrales de nuestra galaxia espiral y en otros tipos de galaxias, como las elípticas, la formación estelar y, por ende, la acumulación de

elementos químicos pesados, fue más rápida e intensa, de manera que las condiciones químicas para la formación planetaria se alcanzaron cuando el universo tenía cerca de $1/_{14}$ de su edad actual.

Actualmente, en un centímetro cúbico de material promedio del universo 91% de los átomos contenidos en él son átomos de hidrógeno (H), 8.9% son de helio y apenas 0.1% son átomos de elementos químicos más pesados que el helio, a los que en astronomía se denominan metales, siendo el carbono (C), el nitrógeno (N) y el oxígeno (O) tres de los cuatro metales más abundantes. El hidrógeno se originó en la Gran Explosión, hace 13.8 mil millones de años, mientras los elementos pesados han sido generados por medio de reacciones nucleares en el interior de estrellas masivas, de baja masa y binarias interactuantes, desde aquel entonces hasta la actualidad.

Con ese 0.1% de átomos de metales y los abundantes átomos de hidrógeno el universo ha logrado crear una química sorprendentemente variada, pero en determinadas y escasas zonas. Las condiciones fisicoquímicas para unir los cuatro elementos químicos biogénicos (CHON) en diversas combinaciones y formar moléculas complejas están presentes en 0.4%, aproximadamente, de la masa del medio interestelar del universo (Ménard y Fukugita, 2012), en particular en zonas donde se forman estrellas y sistemas planetarios. Recientemente, se han detectado moléculas orgánicas complejas en los discos protoplanetarios, pero aún no se ha observado ninguna molécula prebiótica.

Cuando se logre detectar moléculas prebióticas en zonas de formación estelar, se podrá decir que estas moléculas se almacenan en los cometas y éstos podrían entregar el material prebiótico a los planetas sólidos del sistema planetario en formación. La materia prima de la vida estaría disponible para el planeta, pero la vida en sí se desarrollará dependiendo de las condiciones locales de cada planeta. Con los nuevos telescopios, la detección de un aminoácido en el medio interestelar y, por ende, la posible inferencia de la materia prima extraterrestre generadora de vida, sólo es cuestión de tiempo.

CRÉDITOS

Leticia Carigi agradece a Marcelino Agúndez por el interés que mostró durante la redacción de este capítulo y, en especial, por proveerle la figura II.7, junto con una versión completa de su tesis doctoral.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguado, D. S., *et al.*, “J0023+0307: A Mega Metal-poor Dwarf Star from SDSS/BOSS”, *The Astrophysical Journal*, 854: L34, 2018.
- Agúndez, M., *Estudio de la química en la envoltura circunestelar IRC+10216*, Doctorado, Universidad Autónoma de Madrid, 2009, 312 pp.
- Asplund, M., *et al.*, “The Chemical Composition of the Sun”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 47(1): 481-522, 2009.
- Bilikova, J., *et al.*, “Supernova Remnants in the Magellanic Clouds. IX. Multiwavelength Analysis of the Physical Structure of N49”, *The Astronomical Journal*, 134(6): 2308-2317, 2007.
- Cami, J., *et al.*, “Detection of C₆₀ and C₇₀ in a Young Planetary Nebula”, *Science*, 329(5996): 1180-1182, 2010.
- Carigi, L., *et al.*, “Carbon, Nitrogen, and Oxygen Galactic Gradients: A Solution to the Carbon Enrichment Problem”, *The Astrophysical Journal*, 623(1): 213-224, 2005.
- Carigi, L., *et al.*, “The Last 5 Gyr of Galactic Chemical Evolution Based on H II Region Abundances Derived from a Temperature Independent Method”, *The Astrophysical Journal*, 873(2): 107, 2019.
- Chang, R., *Chemistry*, McGraw-Hill Higher Education, EUA, 2007, 1063 pp.
- Delgado-Inglada, G., *et al.*, “Oxygen Enrichment in Carbon-rich Planetary Nebulae”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449(2): 1797-1810, 2015.
- Fernández-Alvar, E., *et al.*, “Disentangling the Galactic Halo with Apogee II Chemical and Star Formation Histories for the Two Distinct Populations”, *The Astrophysical Journal*, 852(1): 50 (12 pp.), 2018.
- Ferrière, K. M., “The Interstellar Environment of Our Galaxy”, *Reviews of Modern Physics*, 73(4): 1031-1066, 2001.
- Goldhaber, G., “The Acceleration of the Expansion of the Universe: A Brief Early History of the Supernova Cosmology Project (SCP)”, *American Institute of Physics Conference Series*, 53-72, 2009.
- Houdek, G., y D. O. Gough, “On the Seismic Age and Heavy-element Abundance of the Sun”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 418: 1217-1230, 2011.
- Hubble, E., “A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-galactic Nebulae”, *Contributions from the Mount Wilson Observatory*, 3: 23-28, 1929.

- Kajino, T., *et al.*, “Current Status of R-process Nucleosynthesis”, *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 107: 109-166, 2019.
- Kuan, Y.-J., *et al.*, “Interstellar Glycine”, *The Astrophysical Journal*, 593: 848-867, 2003.
- López-Sepulcre, A., *et al.*, “Interstellar Formamide (NH_2CHO), a Key Prebiotic Precursor”, *ACS Earth and Space Chemistry*, 3(10): 2122-2137, 2019.
- Lu, F. J., *et al.*, “The Single-degenerate Binary Origin of Tycho’s Supernova as Traced by the Stripped Envelope of the Companion”, *The Astrophysical Journal*, 732, 2011.
- McDonough, W. F., “Chapter 1. The Composition of the Earth”, en R. Teisseyre y E. Majewski (eds.), *International Geophysics*, Academic Press, 2001, pp. 3-23.
- McKee, C. F., y J. P. Ostriker, “A Theory of the Interstellar Medium: Three Components Regulated by Supernova Explosions in an Inhomogeneous Substrate”, *The Astrophysical Journal*, 218: 148-169, 1977.
- McMillan, P. J., “Mass Models of the Milky Way”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414: 2446-2457, 2011.
- Ménard, B., y M. Fukugita, “Cosmic Dust in Mg II Absorbers”, *The Astrophysical Journal*, 754(2): 116 (118 pp.), 2012.
- Peimbert, M., *et al.*, “Revised Primordial Helium Abundance Based on New Atomic Data”, *The Astrophysical Journal*, 666: 636-646, 2007.
- Planck-Collaboration, *et al.*, Planck 2018 Results VI Cosmological Parameters, arXiv e-prints, arXiv:1807.06209.
- Richard, J., *et al.*, “Discovery of a Possibly Old Galaxy at $z = 6.027$, Multiply Imaged by the Massive Cluster Abell 383”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414: L31-L35, 2011.
- Salaris, M., y S. Cassisi, *Evolution of Stars and Stellar Populations*, Wiley, Universidad de Michigan, 2006, 394 pp.
- Snyder, L. E., *et al.*, “A Rigorous Attempt to Verify Interstellar Glycine”, *The Astrophysical Journal*, 619: 914-930, 2005.
- Steigman, G., “Primordial Alchemy: The Big Bang to the Present Universe”, en C. Esteban *et al.* (eds.), *Cosmochemistry: The Melting Pot of the Elements*, Cambridge University Press, Reino Unido, 2011, pp. 1-29.
- Vidali, G., *et al.*, “Formation of Molecular Hydrogen on Analogues of Interstellar Dust Grains: Experiments and Modelling”, *Journal of Physics Conference Series*, 36-58, 2005.

ACTIVIDADES DE REVISIÓN

1. Calcula la densidad promedio del Sol, de Júpiter y de la Tierra, suponiendo que son esferas perfectas con densidad uniforme (lo cual no es cierto). Ordena estos objetos astronómicos según su densidad y compáralos con la densidad del agua líquida y del aire a 20 °C. Datos: $M_{\text{Sol}} = 2 \times 10^{30}$ kg, $R_{\text{Sol}} = 7 \times 10^5$ km, $M_{\text{Jup}} = 2 \times 10^{27}$ kg, $R_{\text{Jup}} = 7 \times 10^4$ km, $M_{\text{Tierra}} = 6 \times 10^{24}$ kg, $R_{\text{Tierra}} = 6.4 \times 10^3$ km, densidad aire = 1.2 kg m^{-3} y densidad agua = 1 g cm^{-3} .
2. Si se contara con el telescopio más potente jamás construido, ¿a qué distancia se encontraría el objeto más lejano que pudiéramos observar? y ¿cuántas Vías Lácteas se podrían alinear desde un extremo a otro del universo?
3. Supongamos que en una nube molecular se están formando estrellas aisladas con masas de 0.1 a 60 $M_{\odot}$. ¿Cuánto tiempo transcurrirá para que el gas de la nube sea enriquecido químicamente por la primera estrella formada en él? Y en esa nube, ¿cuándo dejará de recibir el medio interestelar oxígeno sintetizado por las estrellas masivas que se formaron?
4. La estrella más rica en elementos químicos a la que se le han detectado planetas tiene una abundancia de hierro relativa al Sol, $[\text{Fe}/\text{H}]$, igual a +0.56. ¿Cuál es la metalicidad de la estrella, Z_* , en función de la metalicidad solar, $Z_{\odot}$?, suponiendo que la abundancia de H y que la proporción de hierro a metales son idénticas en ambas estrellas.
5. En una región dentro de una galaxia muy pobre en metales, con metalicidad inicial $Z(0) = 10^{-5}$, se crean subsecuentes poblaciones estelares. Si se desprecia el tiempo de vida de todas las estrellas, entonces cada población estelar muere inmediatamente después de nacer y retorna al medio interestelar 30% del gas que utilizó para su formación ($R = 0.30$). La eficiencia de cada población estelar para sintetizar metales y eyectarlos al medio interestelar es igual a 2% ($Y_Z = 0.02$). Suponiendo que la región galáctica ni gana ni pierde material de las zonas circundantes y que la formación estelar es proporcionalmente eficiente (v) al contenido de gas; entonces la masa de gas, M_{gas} , evoluciona como $M_{\text{gas}}(t) = M_{\text{gas}}(0) \exp(-(1 - R)vt)$ y la metalicidad, Z , evoluciona según $Z(t) = Z(0) - Y_Z \ln(\mu(t))$, donde $\mu(t) = M_{\text{gas}}(t)/M_{\text{gas}}(0)$ es el consumo de gas. Considerando que la eficiencia de formación estelar, v , es igual a 0.02 Ga^{-1} y que los planetas tipo terrestre se forman a partir de gas con metalicidad mayor que 0.1 veces la metalicidad solar ($Z_{\odot} = 0.014$), indica cuánto tiempo después de empezar la formación estelar se crearán los primeros planetas tipo terrestre.

III. SISTEMAS PLANETARIOS

ANTÍGONA SEGURA*

INTRODUCCIÓN

Los planetas son lugares donde pueden existir las condiciones para que la vida se origine y evolucione y pueden ofrecer un ambiente rico en compuestos inorgánicos y orgánicos en un estado termodinámico adecuado para dar origen a moléculas complejas y, probablemente, para el origen y la evolución de la vida (Scharf, 2009).

En nuestro sistema solar tenemos ocho planetas y al menos 167 satélites, todos los cuales dan cuenta de la variedad de mundos que podemos encontrar alrededor de una estrella. Dos de los planetas del sistema solar son gigantes gaseosos, Júpiter y Saturno, compuestos básicamente de hidrógeno y helio. Les siguen en tamaño dos gigantes helados, Urano y Neptuno, compuestos de agua, metano y materiales más pesados como los silicatos.

El resto de los planetas son terrestres, formados principalmente por silicatos, hierro y níquel. El cuadro III.1 resume algunas características de nuestro sistema solar que apoyarán la discusión a lo largo de este capítulo. Más allá del sistema solar se han detectado más de 1 000 planetas que giran alrededor de otras estrellas (<http://exoplanet.eu/>), algunos de los cuales tienen características muy distintas a las de los planetas de nuestro sistema. La variedad de mundos que podemos encontrar y su potencial para ser habitables quedan determinados a partir de su formación y su posterior evolución geológica. Durante la formación del planeta quedan establecidas su composición química, su estructura y la energía disponible para sostener un campo magnético y procesos geológicos como el vulcanismo.

* Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México: <https://orcid.org/0000-0002-2240-2452>.

FORMACIÓN Y EVOLUCIÓN DE DISCOS PROTOPLANETARIOS

La generación de estrellas y planetas está íntimamente ligada. Las estrellas se forman dentro de nubes moleculares, compuestas de polvo y gas dejado atrás por estrellas en sus últimas fases de evolución (véase capítulo II). Estas nubes moleculares no son homogéneas; contienen zonas de mayor densidad donde puede ocurrir un colapso gravitacional. La contracción de una nube para formar una estrella sucede cuando en una de estas zonas de alta densidad la presión del gas es menor a la fuerza de gravedad de la nube. El colapso se inicia cuando la masa de la nube excede el límite de la llamada masa de Jeans:

$$M_{Jeans} = \left[\frac{5kT}{Gm} \right]^{3/2} \left[\frac{3}{4\pi\rho} \right]^{1/2} \quad \text{Ec. III.1}$$

Donde k es la constante de Boltzmann, G la constante gravitacional, $m = \mu m_p$, con μ el peso molecular medio del gas, y m_p la masa del protón, siendo T la temperatura de la nube y ρ su densidad. Al iniciarse el colapso la nube tiene un momento angular que debe conservarse durante dicho colapso. El momento angular está dado por:

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times m\mathbf{v} \quad \text{Ec. III.2}$$

Esta es una cantidad vectorial que depende del radio, r , del sistema, y de la velocidad tangencial, v .

CUADRO III.1. *Propiedades de los planetas del sistema solar (Scharf, 2009)*

Planeta	Masa ^a		Radio ^b		Densidad (g cm ⁻³)	Semieje mayor (UA)	Excentricidad
	M _⊕	M _J	R _⊕	R _J			
Mercurio	0.06	1.89 × 10 ⁻⁴	0.38	0.034	5.4	0.39	0.206
Venus	0.82	2.58 × 10 ⁻³	0.95	0.085	5.3	0.72	0.007
Tierra	1.00	3.15 × 10 ⁻³	1.00	0.089	5.5	1.00	0.017
Marte	0.11	3.46 × 10 ⁻⁴	0.53	0.047	3.9	1.52	0.093
Júpiter	317.8	1.00	11.19	1.000	1.3	5.20	0.048
Saturno	95.2	3.00 × 10 ⁻¹	9.46	0.843	0.7	9.54	0.054
Urano	14.6	4.59 × 10 ⁻²	4.01	0.357	1.3	19.22	0.047
Neptuno	17.2	5.41 × 10 ⁻²	3.81	0.340	1.6	30.06	0.009

NOTAS: ^a Masa de la Tierra, M_⊕ = 5.97 × 10²⁴ kg. Masa de Júpiter, M_J = 1.89 × 10²⁷ kg. ^b Radio de la Tierra, R_⊕ = 6 371 km. Radio ecuatorial de Júpiter, R_J = 71 492 km.

El cambio en el tiempo del momento angular se denomina *torca*, la cual es nula a menos que haya un intercambio de energía que permita que cambie el momento angular. Puesto que el momento angular se conserva, al reducirse el radio de la nube debido al colapso, su velocidad de giro aumenta. De esta forma, la nube no puede encogerse hasta el tamaño de una estrella debido a que la fuerza centrífuga sería lo suficientemente grande para destruir dicha nube. Así pues, la nube forma un disco que permite conservar el momento angular del sistema. En el centro del disco se forma la protoestrella. Cuando la presión y la temperatura en el núcleo de esta protoestrella son suficientemente altas se inician las reacciones termonucleares que “encienden” al objeto convirtiéndolo en una estrella.

Los discos circunestelares son resultado de la formación de las estrellas y se han observado en estrellas en todos los rangos de masa. Están formados por gas (99% de su masa) y sólidos (1% de su masa) y tienen radios del orden de 100 UA. Las masas de estos discos van de 10^{-3} a $10^{-1} M_{\odot}$ (Andrews y Williams, 2005). Los objetos que originan a las estrellas de masas intermedias (2-10 $M_{\odot}$) son denominados objetos Herbig Ae/Be, mientras que los objetos que dan origen a las estrellas de masas similares al Sol son llamados objetos T Tauri. Las observaciones en longitudes de onda que van desde el visible hasta el radio nos permiten inferir la estructura y la composición de los discos. Debido a que éstos son ópticamente gruesos, es decir que la luz no los atraviesa, sólo podemos inferir los procesos internos del disco a partir de lo que emite la superficie de éste. Otro problema es la resolución espacial de las observaciones. En un principio las observaciones no permitían diferenciar la emisión de las regiones más cercanas a la estrella de aquella emisión producida en las zonas externas del disco. Más recientemente, una nueva generación de instrumentos que utilizan la técnica de interferometría ha permitido muestrear las zonas del disco más cercanas a la estrella en algunos objetos (Millan-Gabet *et al.*, 2007). Los componentes de los discos inferidos a partir de observaciones se listan en el cuadro III.2.

Evolución de los discos protoplanetarios

Los conceptos más relevantes para la comprensión de la evolución de los discos protoplanetarios son la viscosidad y la transferencia de momento angular a través de torcas. La viscosidad, ν , es una medida de la resistencia de un fluido a moverse o fluir. Shakura y Sunyaev (1973) propusieron expresar la viscosidad a partir del parámetro adimensional α :

$$\nu = \alpha c_s h \quad \text{Ec. III.3}$$

Siendo c_s la velocidad del sonido en el disco y h la escala de altura del disco. El parámetro α es, en general, considerado una constante, lo que permite determinar propiedades generales del disco, como temperatura o densidad superficial. Sin embargo, no hay una razón física para que este parámetro sea constante. El problema radica en que la fuente de la viscosidad del disco no está bien determinada, por lo que tampoco podemos predecir la dependencia de ésta en relación con las propiedades del disco. Los valores típicos de α son del orden de 10^{-2} .

CUADRO III.2. *Componentes de los discos protoplanetarios*
(Bergin et al., 2007, y Millan-Gabet et al., 2007)

Componente	Composición	Longitud de onda en la que se detecta	Zona del disco
Polvo	Silicatos amorfos	~ 10 y $20 \mu\text{m}$	> 2 UA
	Silicatos cristalinos (fosterita cristalina, olivino rico en Mg, $\text{Mg}_{2x}\text{Fe}_{2x-2}\text{SiO}_4$, $x = 1$)	$11.3 \mu\text{m}$	< 2 UA principalmente
Hielos	Cristales de agua	44 y $63 \mu\text{m}$	zonas con $T < 100$ K
	Hielos de CO y CO ₂	4.7 y $15 \mu\text{m}$, respectivamente	
	Hielo de NH_4^+	$6.85 \mu\text{m}$	
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH)	Moléculas de carbono	$3.3, 6.2, 7.7, 8.6,$ 11.2 y $12.8 \mu\text{m}$	10 - 100 UA
Moléculas en fase gaseosa	CO	Líneas de emisión vibracionales y rotacionales a $4.7 \mu\text{m}$	Las líneas de CO pueden ser excitadas por colisiones con el gas caliente en el disco interno (< 5 - 10 UA) así como en el IR o por bombeo UV en las capas superiores y exteriores ($r > 10$ UA)
	C ₂ H ₂ , HCN y CO ₂	$13.7, 14$ y $15 \mu\text{m}$, respectivamente	$T \sim 300$ - 700 K. Disco interno
	HCN, HCO ⁺ , N ₂ H ⁺ , formaldehído (CH ₂ O) y metanol (CH ₃ OH)	Milimétrico y submilimétrico	

Los mecanismos del transporte de momento angular en los discos protoplanetarios no están del todo claros. Una de las fuentes podría ser la turbulencia, que es parametrizada a través de la viscosidad; sin embargo, las simulaciones muestran que el disco es estable ante la turbulencia. Hasta ahora, el mecanismo más aceptado para el transporte de momento angular es la inestabilidad magnetorrotacional (IMR). La interacción entre el campo magnético generado por la estrella y el gas ionizado del disco dan lugar a una inestabilidad en la que el material del disco pierde momento angular de manera que es transportado hacia radios menores, mientras que otra parte adquiere momento angular haciendo que el disco se extienda a radios mayores. El disco transfiere masa hacia el objeto central que continúa contrayéndose hasta que su núcleo alcanza la temperatura y la presión necesarias para iniciar las reacciones termonucleares. Estas reacciones convierten hidrógeno en helio, liberando la energía que hace brillar a la estrella. El disco protoplanetario comienza a fotoevaporarse, es decir, a perder masa, debido a la radiación de la estrella. En el transcurso de 10 a 100 millones de años el disco pierde el gas, lo que pone un límite de tiempo a la formación de planetas gigantes gaseosos. La primera zona del disco que pierde gas es la más cercana a la estrella. Mientras esto sucede, el polvo se va asentando en el plano medio del disco y forma partículas cada vez más grandes. A partir de estos agregados se formarán los planetas. Un disco que ha perdido todo su gas se denomina *disco de escombros*; el sistema solar, por ejemplo, cae dentro de esta categoría. La evolución posterior del disco está determinada por las interacciones entre los sólidos remanentes de la formación planetaria y los planetas.

Evolución química de los discos protoplanetarios

La evolución del disco protoplanetario también implica cambios en su composición química. El estado inicial del disco depende de la composición del gas y el polvo interestelar de la nube que se colapsa para formar el disco y de los procesos químicos que se producen durante la etapa del colapso. La estrella y su disco protoplanetario se forman de los mismos materiales iniciales, por lo que las abundancias de los elementos de la estrella nos dicen cuál era la composición original del disco en términos de elementos químicos; sin embargo, esto no es suficiente para saber en qué moléculas estaban organizados esos elementos.

El material del disco protoplanetario evoluciona químicamente conforme es incorporado en los planetésimos a través de los procesos que se dan en el

disco. Este proceso es fundamental para comprender la formación y la composición final de los planetas. Durante la etapa inicial del colapso, el gas de la nube molecular cae en el disco pasando a través de un frente de choque y puede ser calentado nuevamente mientras cae nuevo material o si, por la evolución dinámica del disco, el gas es llevado cerca de la protoestrella. La composición química puede ser calculada en las zonas donde el material de la nebulosa experimenta temperaturas lo suficientemente altas (> 2000 K) como para evaporar y disociar todo el gas y el polvo entrante. A estas temperaturas puede considerarse que los compuestos químicos están en equilibrio termodinámico, puesto que las reacciones suceden con mayor rapidez que la tasa a la que se enfría el disco. Esto puede suceder cerca de la protoestrella, pero en las zonas donde las temperaturas son menores, las velocidades de las reacciones son comparables con la tasa de enfriamiento del gas; por lo tanto, las reacciones se encuentran fuera de equilibrio y el proceso de formación de compuestos se vuelve más complicado. Cada especie química se “congela” a cierta temperatura; por ejemplo, la forma termodinámicamente más estable del carbono es el monóxido de carbono (CO) a $T \geq 700$ K y el CH_4 a temperaturas menores. El nitrógeno es más estable en forma de N_2 a $T \geq 300$ K y como amoníaco (NH_3) a temperaturas menores. Así pues, el CO y el N_2 dominan las zonas tibias del disco mientras que el CH_4 y el NH_3 dominan las regiones más frías (De Pater y Lissauer, 2001).

Conforme el disco protoplanetario se enfría, los elementos se condensan a temperaturas características. Los minerales refractarios, como las tierras raras y los óxidos de aluminio, calcio y titanio (por ejemplo, corindón, Al_2O_3 y perovskita, CaTiO_3) se condensan a ~ 1700 K. El níquel y el hierro se condensan formando una aleación a ~ 1400 K. A temperaturas ligeramente menores aparecen los silicatos de magnesio, como la forsterita (Mg_2SiO_4) y la ensatita (MgSiO_3). A $T \leq 1200$ K los primeros feldespatos aparecen; primero los que contienen los minerales más refractarios como la anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), y más tarde ($T \sim 1100$ K) feldespatos de sodio y potasio ($(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$). Los minerales que se forman en esta etapa dependen de qué tan rápido es el crecimiento de los granos de polvo con respecto al enfriamiento. El agua se combina con el hierro formando óxidos de hierro a ~ 500 K. La secuencia de condensación a temperaturas menores es incierta, lo cual se debe a que las reacciones, aunque son favorecidas termodinámicamente, tienen energías de activación altas. Esto significa que se requieren altas densidades para que las reacciones alcancen el equilibrio, por lo que están cinéticamente inhibidas (De Pater y Lissauer, 2001).