



**UNIVERSIDAD DEL SURESTE**

**Licenciatura**

Medicina Humana

**Materia**

Diseño experimental.

**Docente**

Dr. Israel de Jesús Gordillo González.

**Trabajo**

Análisis de los artículos.

**Estudiante**

Kevin Jahir Kraul Borrallés

**Grado y grupo**

4 semestre

Grupo "A"

Parcial 3

Tapachula, Chiapas

21 de Mayo de 2024

### a) ¿Cuál es el problema de investigación?

El problema de investigación que abordan los estudios de astrobiología en México se centra en el entendimiento del origen, distribución y evolución de la vida en el universo. Este campo de estudio, que combina elementos de la astrofísica, geología, biología y química, busca responder preguntas fundamentales acerca de cómo y dónde podría existir la vida fuera de la Tierra. Entre los principales objetivos se encuentran la identificación de compuestos orgánicos y biomoléculas en otros planetas, la comprensión de la química prebiótica que podría dar lugar a la vida, y el desarrollo de tecnologías que permitan la exploración de ambientes extremos similares a los que podrían encontrarse en otros cuerpos celestes.

Específicamente, en México, los problemas de investigación se han focalizado en varias áreas clave. Uno de los aspectos más destacados es la participación de científicos mexicanos en misiones espaciales internacionales, como la misión ExoMars de la Agencia Espacial Europea (ESA) y la NASA, donde se han centrado en la detección de compuestos orgánicos en la superficie de Marte. Además, se ha investigado la química prebiótica en la Tierra, intentando replicar las condiciones que podrían haber dado origen a la vida en ambientes primitivos similares a los de Marte.

Otro aspecto relevante es el estudio de los organismos extremófilos y su capacidad para sobrevivir en condiciones extremas, lo que proporciona pistas sobre las formas de vida que podrían existir en otros planetas. Investigadores mexicanos han trabajado en colaboración con instituciones internacionales para desarrollar tecnologías que faciliten la búsqueda de vida extraterrestre y la exploración de ambientes extraterrestres hostiles.

En resumen, el problema de investigación en México aborda una amplia gama de cuestiones relacionadas con la astrobiología, desde la identificación de moléculas orgánicas en Marte hasta la replicación de procesos prebióticos en laboratorios terrestres. Estas investigaciones buscan no solo entender mejor el origen de la vida en la Tierra, sino también las posibles formas y condiciones en las que la vida podría existir en otros lugares del universo.

### b) ¿Cuál es la muestra?

La muestra en los estudios de astrobiología en México es diversa y abarca varias líneas de investigación y experimentos. Entre los más destacados se encuentran los siguientes:

1. **Misiones Espaciales:** La participación de científicos mexicanos en misiones espaciales como ExoMars y el Sample Analysis at Mars (SAM) de la NASA. Estos proyectos buscan analizar muestras de suelo y atmósfera marciana para detectar la presencia de compuestos orgánicos y posibles biofirmas.
2. **Investigaciones de Laboratorio:** Estudios de química prebiótica liderados por investigadores como Antonio Lazcano, que buscan recrear en laboratorio las condiciones primitivas de la Tierra para entender cómo se formaron las primeras biomoléculas y los sistemas biológicos.
3. **Organismos Extremófilos:** Investigaciones sobre organismos capaces de sobrevivir en condiciones extremas, como los tardígrados y ciertas bacterias. Estos estudios se llevan a cabo tanto en laboratorio como en ambientes naturales extremos de la Tierra, como los desiertos y las profundidades oceánicas.

4. **Colaboraciones Internacionales:** Participación en proyectos internacionales que investigan la posibilidad de vida en otros cuerpos celestes, como las lunas heladas de Júpiter y Saturno. Estos proyectos incluyen el desarrollo de tecnologías y métodos de análisis para futuras misiones de exploración espacial.

Cada uno de estos componentes de la muestra ha sido seleccionado por su relevancia y potencial para contribuir al entendimiento del problema de investigación en astrobiología. La diversidad de enfoques y la colaboración con instituciones de renombre aseguran que los datos y resultados obtenidos sean robustos y significativos.

### c) ¿Cómo fue elegida?

La elección de la muestra en los estudios de astrobiología en México se basa en varios criterios clave:

1. **Relevancia Científica:** Se seleccionaron investigaciones y experimentos que tienen un impacto significativo en el campo de la astrobiología. Esto incluye trabajos que contribuyen a la detección de vida en otros planetas, el entendimiento de la química prebiótica y la adaptación de organismos a condiciones extremas.
2. **Colaboración Internacional:** La participación en proyectos internacionales y misiones espaciales fue un factor crucial. La colaboración con agencias espaciales como la NASA y la ESA permite acceso a tecnologías avanzadas y datos valiosos, además de aumentar la visibilidad y el impacto de las investigaciones mexicanas.
3. **Expertise y Trayectoria:** Se seleccionaron estudios liderados por investigadores con una reconocida trayectoria en el campo de la astrobiología. Científicos como Rafael Navarro y Antonio Lazcano han sido pioneros en sus respectivas áreas, contribuyendo significativamente al conocimiento actual sobre el origen y la evolución de la vida.
4. **Diversidad de Enfoques:** La muestra incluye una variedad de enfoques, desde estudios de laboratorio hasta misiones espaciales y trabajos de campo en ambientes extremos de la Tierra. Esta diversidad permite abordar el problema de investigación desde múltiples perspectivas y obtener una comprensión más completa y multidimensional.
5. **Potencial de Innovación:** Se consideraron investigaciones que aportan innovaciones tecnológicas o metodológicas significativas. Esto incluye el desarrollo de nuevos instrumentos para la detección de compuestos orgánicos y biofirmas, así como la mejora de técnicas de análisis y simulación de condiciones extraterrestres.

La selección cuidadosa de la muestra asegura que los estudios incluidos sean representativos y relevantes, proporcionando una base sólida para obtener resultados significativos y aplicables a la astrobiología en general.

### d) ¿Son adecuadas la muestra y el procedimiento de muestreo para el problema que se investigó?

La muestra y el procedimiento de muestreo utilizados en los estudios de astrobiología en México son adecuados para abordar el problema de investigación. La diversidad y relevancia de los estudios seleccionados aseguran que los datos obtenidos sean robustos

y útiles para entender el origen, distribución y evolución de la vida en el universo. A continuación, se presentan algunos argumentos que sustentan esta adecuación:

1. **Diversidad de la Muestra:** La inclusión de una variedad de enfoques y métodos, desde estudios de laboratorio hasta misiones espaciales, permite una comprensión integral del problema de investigación. Esta diversidad es crucial para abordar las múltiples facetas de la astrobiología, desde la química prebiótica hasta la adaptación de organismos a condiciones extremas.
2. **Colaboraciones Internacionales:** La participación en proyectos internacionales asegura el acceso a tecnologías avanzadas y datos de alta calidad. Además, las colaboraciones con agencias espaciales como la NASA y la ESA proporcionan una validación adicional de los métodos y resultados, ya que estos deben cumplir con estándares científicos rigurosos.
3. **Relevancia Científica:** Los estudios seleccionados son de gran relevancia para el campo de la astrobiología. La identificación de compuestos orgánicos en Marte, por ejemplo, es un hallazgo crucial que tiene implicaciones significativas para la búsqueda de vida extraterrestre. Del mismo modo, los estudios sobre química prebiótica y organismos extremófilos aportan conocimientos fundamentales sobre los posibles escenarios en los que podría surgir la vida.
4. **Metodología Sólida:** Los procedimientos de muestreo y análisis utilizados en estos estudios son metodológicamente sólidos y están bien documentados. Esto incluye el uso de técnicas avanzadas de detección y análisis químico, así como métodos experimentales rigurosos para replicar condiciones extraterrestres en el laboratorio.
5. **Impacto y Contribución:** Los estudios han producido resultados significativos que han sido reconocidos por la comunidad científica internacional. Esto no solo valida la adecuación de la muestra y el procedimiento de muestreo, sino que también demuestra el impacto y la relevancia de las investigaciones mexicanas en el campo de la astrobiología.

#### e) ¿Cuáles son los principales resultados o conclusiones?

Los principales resultados y conclusiones de estos estudios incluyen:

1. **Detección de Compuestos Orgánicos en Marte:** La misión ExoMars y el instrumento SAM han identificado compuestos orgánicos en Marte, sugiriendo posibles procesos prebióticos.
2. **Química Prebiótica:** Los estudios en laboratorio han replicado condiciones primitivas que podrían haber llevado al origen de la vida, mostrando cómo moléculas simples pueden formar estructuras más complejas.
3. **Organismos Extremófilos:** Las investigaciones han demostrado que ciertos organismos pueden sobrevivir en condiciones extremas, lo que sugiere que formas de vida podrían existir en ambientes similares en otros planetas .

#### f) ¿Dichos resultados son generalizables a una población mayor?

Los resultados son parcialmente generalizables a una población mayor dentro del contexto de organismos extremófilos y condiciones prebióticas. Sin embargo, la generalización a

todos los tipos de vida es limitada debido a la singularidad de las adaptaciones de estos organismos y las condiciones específicas de los experimentos. Los resultados son más aplicables a la búsqueda de vida en ambientes extremos similares a los estudiados en estos proyectos .

**g) Con base en la muestra, ¿pueden tomarse como serias dichas generalizaciones justifican tu respuesta?**

Las generalizaciones pueden considerarse serias y bien fundamentadas dentro del ámbito de organismos extremófilos y condiciones prebióticas, pero deben hacerse con cautela. La solidez metodológica de los estudios, la colaboración con instituciones internacionales y los resultados significativos respaldan la validez de estas generalizaciones. Sin embargo, extrapolar estos resultados a todos los tipos de vida sería inapropiado debido a las diferencias en adaptaciones y condiciones ambientales .

**Evaluación de la Solidez de los Cuatro Estudios**

1. **Problema de Investigación:** Claramente definido y relevante para la astrobiología y la exploración espacial. Se enfoca en cuestiones fundamentales sobre la vida en el universo, desde la detección de compuestos orgánicos hasta la supervivencia en condiciones extremas.
2. **Muestra:** Adecuada y representativa, abarcando estudios y experimentos de laboratorio, misiones espaciales y trabajos de campo. La diversidad de la muestra permite abordar el problema de investigación desde múltiples perspectivas.
3. **Selección de la Muestra:** Basada en la relevancia científica y la contribución significativa al campo. La participación en proyectos internacionales y la inclusión de investigadores reconocidos aseguran la calidad y el impacto de los estudios.
4. **Procedimiento de Muestreo:** Metodológicamente sólido y bien fundamentado. Los procedimientos utilizados cumplen con los estándares científicos internacionales y garantizan la obtención de datos robustos y significativos.
5. **Resultados y Conclusiones:** Significativos y relevantes. Los hallazgos sobre la detección de compuestos orgánicos, la química prebiótica y la supervivencia de organismos extremófilos aportan conocimientos valiosos para la astrobiología y la exploración espacial.
6. **Generalización de Resultados:** Parcialmente aplicable a una población mayor en contextos específicos de organismos extremófilos y condiciones prebióticas. Las generalizaciones son serias y justificadas dentro de estos límites, pero deben hacerse con cautela para no extrapolar indebidamente a otros tipos de vida.
7. **Solidez de las Generalizaciones:** Las generalizaciones basadas en la muestra son bien fundamentadas y respaldadas por metodologías rigurosas y colaboraciones internacionales. La diversidad y calidad de los estudios aseguran la validez de las conclusiones dentro del contexto específico de la astrobiología.

En conclusión, los estudios de astrobiología en México son sólidos y bien fundamentados, proporcionando una contribución significativa al entendimiento del origen, distribución y evolución de la vida en el universo. La combinación de enfoques diversos, colaboraciones

internacionales y metodologías rigurosas asegura la robustez y relevancia de los resultados obtenidos.

## ARTICULO NUMERO 2

Para abordar las preguntas sobre el artículo proporcionado, primero es esencial entender su contenido. El documento, titulado "La última década y el futuro de la cosmología y la astrofísica" de Martin Rees, explora avances significativos en estas áreas durante la última década y proyecta futuras tendencias y descubrimientos. Basado en este contexto general, aquí están las respuestas detalladas a las preguntas:

### **a) ¿Cuál es el problema de investigación?**

El problema de investigación en el artículo de Martin Rees se centra en entender y resumir los avances clave en la cosmología y la astrofísica durante la última década, así como prever los posibles desarrollos futuros en estas áreas. Rees aborda cuestiones fundamentales como la formación y evolución de galaxias, la naturaleza de los agujeros negros, la energía oscura, la materia oscura y el concepto del multiverso. Además, analiza cómo estos descubrimientos han cambiado nuestra comprensión del universo y qué desafíos persisten para la comunidad científica.

### **b) ¿Cuál es la muestra?**

Dado que el artículo es una revisión de avances científicos, la "muestra" en este contexto se refiere a los estudios, observaciones y datos empíricos de la última década que Rees analiza. Esto incluye investigaciones realizadas por telescopios terrestres y espaciales, experimentos de detección de ondas gravitacionales, estudios de la radiación de fondo de microondas, y observaciones de fenómenos astronómicos como supernovas y galaxias lejanas.

### **c) ¿Cómo fue elegida?**

La selección de estos estudios y datos no sigue un procedimiento de muestreo tradicional. En cambio, Rees selecciona aquellos avances que considera más significativos e impactantes para la cosmología y la astrofísica. Esta elección se basa en su experiencia y criterio como cosmólogo reconocido, y probablemente incluye investigaciones ampliamente aceptadas y validadas por la comunidad científica.

### **d) ¿Son adecuadas la muestra y el procedimiento de muestreo para el problema que se investigó?**

Sí, la muestra y el procedimiento de muestreo son adecuados para el problema de investigación. Rees utiliza su profundo conocimiento del campo para seleccionar estudios y datos que representan los avances más cruciales y relevantes. Al enfocarse en estos hitos, proporciona una visión coherente y comprensiva del progreso reciente en cosmología y astrofísica, permitiendo a los lectores entender los desarrollos más importantes y sus implicaciones futuras.

**e) ¿Cuáles son los principales resultados o conclusiones?**

Las principales conclusiones de Rees incluyen:

- **Avances en la comprensión de los agujeros negros:** Incluyendo la detección de ondas gravitacionales que confirmó la existencia de fusiones de agujeros negros.
- **Evidencia de energía y materia oscura:** Aunque su naturaleza sigue siendo un misterio, las observaciones han reforzado su existencia y papel en la estructura y evolución del universo.
- **Estudios detallados de exoplanetas:** Mejorando nuestro conocimiento de la formación planetaria y potenciales condiciones para la vida fuera de la Tierra.
- **Exploración del sistema solar:** Misiones a Marte y otras lunas han proporcionado información valiosa sobre la geología y potencial habitabilidad de estos cuerpos.
- **Confirmación del modelo cosmológico estándar:** Observaciones de la radiación cósmica de fondo y la distribución de galaxias han solidificado el modelo de un universo en expansión desde el Big Bang.

**f) ¿Dichos resultados son generalizables a una población mayor?**

Sí, los resultados son generalizables en el sentido de que los avances y descubrimientos en cosmología y astrofísica impactan nuestra comprensión universal del cosmos. Las conclusiones obtenidas de estos estudios no se limitan a un área geográfica o una muestra demográfica específica, sino que se aplican a todo el universo conocido. Los principios físicos y las observaciones astronómicas son universales y, por lo tanto, sus implicaciones son válidas a nivel global.

**g) Con base en la muestra, ¿pueden tomarse como serias dichas generalizaciones? Justifica tu respuesta.**

Sí, las generalizaciones pueden tomarse como serias debido a la solidez y el rigor de los estudios y observaciones incluidos en la muestra. Los avances citados por Rees provienen de investigaciones revisadas por pares y observaciones corroboradas por múltiples equipos de científicos en todo el mundo. La convergencia de resultados de diferentes métodos y tecnologías refuerza la validez de estas conclusiones. Además, el hecho de que estos avances hayan sido ampliamente discutidos y aceptados por la comunidad científica global añade credibilidad a las generalizaciones hechas.

En resumen, el artículo de Martin Rees presenta una evaluación bien fundamentada y exhaustiva de los avances en cosmología y astrofísica, utilizando una muestra de estudios significativos seleccionados por su relevancia e impacto en el campo.

## El desarrollo de la Astrobiología como ciencia

SEBASTIÁN ALEJANDRO VALENCIA MEZA<sup>1</sup> y ANELY ORTIZ ALEGRÍA<sup>2</sup>

### RESUMEN

***La astrobiología es una ciencia que se encarga de estudiar el origen, la distribución y la evolución de la vida en el universo. Su origen es reciente y el camino para su desarrollo estuvo lleno de retos, sin embargo, en la actualidad es una de las ramas del conocimiento más importantes. El presente artículo abarca la historia de la astrobiología para su consolidación como ciencia, mencionando a algunos de los científicos exponentes en el tema, que realizaron los aportes más relevantes a esta disciplina.***

***Palabras clave:*** Astrobiología, origen, historia

<sup>1</sup>Estudiante de licenciatura en Biología, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, Correo electrónico: a217208385@unison.mx

<sup>2</sup>Estudiante de licenciatura en Biología, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, Correo Electrónico: a218201619@unison.mx

***Autor de correspondencia:*** Sebastián A. Valencia-Meza, a217208385@unison.mx

**Recibido:** 08 / 11 / 2021

**Aceptado:** 04 / 11 / 2022

**Publicado:** 15 / 11 / 2022

### ***Cómo citar este artículo:***

Valencia-Meza, A., & Ortiz Alegría, A. (2022). El desarrollo de la Astrobiología como ciencia: Astrobiología. *EPISTEMUS*, 16(33). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.214>



## The Development of Astrobiology as a Science

### ABSTRACT

***Astrobiology is a science that studies the origin, distribution and evolution of life in the universe. Its origin is recent and the path to its development was full of challenges, however, at present it is one of the most important disciplines. This article covers the history of astrobiology for its consolidation as a science, mentioning some of the scientific exponents in the field who made the most relevant contributions to this discipline.***

***Key words:*** Astrobiology, origin, history





## Introducción

La Astrobiología es el estudio de la vida en el Universo. Su carácter multidisciplinario requiere de la interacción de la astrofísica, la geología y la biología, todas ellas en la búsqueda de vida extraterrestre a través de la exploración in situ, la espectroscopía de atmósferas planetarias solares y extrasolares. Además, hacen uso del modelaje con base en los organismos encontrados en la Tierra [1].

La Astrobiología busca responder preguntas tales como, ¿De qué manera se originó la vida en el planeta Tierra? y ¿Cuáles fueron las características que permitieron el desarrollo de la vida en este planeta?

Siendo preguntas tan vastas, las respuestas recaen en el trabajo colaborativo y en el desarrollo de nuevas tecnologías, apoyándose del trabajo tanto teórico como en laboratorio. Es por eso que en la astrobiología se necesita un espacio comunicativo para obtener la visión holística necesaria para responder las preguntas que se plantean. De esta manera en los grandes centros de investigación de astrobiología se trabaja con profesionales en distintas áreas de la ciencia y los enfoques de investigación son diversos. En el Centro de Astrobiología (CAB) localizado en Madrid, España se trabaja tanto en la simulación de posibles escenarios planetarios que puedan albergar vida, estudio de biomarcadores en sistemas extrasolares o exoplanetas, los distintos metabolismos hipotéticos que pueden presentar organismos vivos y la química prebiótica. Para desarrollar este tipo de estudios se requiere de la interacción de la bioquímica, la astronomía, la astrofísica, la biología molecular y la informática [2].



## Desarrollo

La historia de la astrobiología se inicia durante la segunda guerra mundial, cuando la ciencia incluía un desarrollo tecnológico vasto. Con el financiamiento de programas para la búsqueda de armas y desarrollo industrial, disciplinas novedosas comenzaron a cobrar el interés de gobiernos que antes tenían una visión sesgada hacia aspectos muy concretos. Esta necesidad por el desarrollo científico y tecnológico dejó grandes aportaciones, como un gran desarrollo en la ingeniería y la producción masiva de la penicilina. A su vez nos brindó nuevas disciplinas de la ciencia antes inexploradas, donde se encontraba la astrobiología.

La Astrobiología nace como disciplina científica en Kazajistán en 1941, bajo el liderazgo de Gavriil Adrianovich Tikhov, considerado el pionero de la Astrobotánica [3]. Astrónomos de Moscú y Leningrado, apoyados por el gobierno soviético habían viajado a Alma-Ata en Kazajistán para observar el eclipse solar total del 21 de septiembre. Al final de la guerra, no todos estos astrónomos habían abandonado Alma-Ata y bajo la iniciativa del académico V.G. Fessenkov, se llevaron a cabo planes para construir un observatorio astrofísico. Con el apoyo de K.I. Satpaev, se creó el Instituto de Astronomía y Física dentro de lo que había sido la Academia de Ciencias de la República Soviética Socialista de Kazajistán (ASKSSR). En 1950 se dividió en dos: el Instituto Físico-Técnico y el Instituto de Astrofísica, que ahora lleva el nombre de su fundador V.G. Fessenkov. Tikhov dedicó sus años en Alma-Ata a investigar la posible ocurrencia de la vida fuera de la Tierra. Lideró la organización del Sector de Astrobotánica. Su equipo de investigación estaba compuesto por astrónomos, físicos y biólogos que investigaron la fluorescencia de las plantas en el infrarrojo y otras características ópticas. Junto con la investigación de astrobotánica, algunos de los astrónomos y estudiantes de posgrado realizaron observaciones espectrofotométricas de





la Luna, planetas, cometas, asteroides, así como estrellas magnéticas (estrellas de neutrones con un campo magnético muy fuerte). Su objetivo principal era estudiar las propiedades ópticas de las plantas en diversas condiciones climáticas, incluidas las que se pensaba que existían en Marte y Venus. La idea básica era la posibilidad de que las plantas se adaptaran a las condiciones climáticas severas cambiando su reflectividad espectral. La existencia de vegetación en Marte se consideró seriamente en este contexto histórico porque las observaciones durante varias décadas habían mostrado cambios estacionales, como variaciones en el tamaño de los casquetes polares o en la coloración de las áreas más oscuras llamadas “mares”, esto se atribuyó erróneamente a la presencia de plantas. Sin embargo, a diferencia de la vegetación terrestre, el espectro de los “mares” marcianos no mostró la absorción característica de la clorofila, es importante la consideración de la absorbancia de la clorofila ya que esta es un pigmento presente en plantas, algas y bacterias fotosintéticas. Este pigmento les permite captar la energía de la luz y convertir compuestos inorgánicos como el  $\text{CO}_2$  en compuestos orgánicos como carbohidratos. Por lo que esto sirvió como un poderoso argumento para los opositores a la presencia de vida en Marte. Pero el estudio espectroscópico de plantas que crecen en climas fríos había demostrado que la banda de absorción de la clorofila se ensancha, es decir que el rango dentro del espectro de la luz que la clorofila tiende a absorber se ensancha alcanzando un mayor rango de absorbancia. Este hallazgo fue la base para la suposición de Tikhov de que, en condiciones de muy baja temperatura, la absorción de clorofila podría volverse tan amplia que pasaría desapercibida dentro de una región espectral estrecha [3]. Es importante recalcar que no existen plantas en Marte, sin embargo, el razonamiento de Tikhov, fue bastante importante en su tiempo.



Para apoyar esta teoría, Tikhov y sus compañeros de trabajo realizaron una serie de expediciones en varias épocas del año a zonas de alta montaña, la tundra polar y regiones desérticas frías. Demostraron que las propiedades ópticas en realidad pueden modificarse bajo ciertas condiciones. A muy bajas temperaturas en particular, las plantas absorben energía solar no solo en el rango infrarrojo del espectro, sino también en el rango rojo e incluso amarillo-verde de la región visible. De esta manera se planteó erróneamente que las plantas en Marte absorben todas las frecuencias, pero reflejan solo los violetas y azules. Este razonamiento no es correcto, la superficie de Marte no cuenta con plantas, sin embargo, de su razonamiento y el estudio de la comprensión fisiológica de la vida en la Tierra para hacer inferencias de cómo se podría comportar la vida en otros sitios, parte hacia un pensamiento astrobiológico [4].

Con esto Tikhov estaba desarrollando técnicas que en la actualidad constituyen varias de las disciplinas actuales de la astrobiología y el desarrollo de modelos predictivos de vida en otros planetas tales como los modelos de habitabilidad, estos modelos se utilizan para determinar si un entorno es habitable o los factores claves que son responsables de la transición gradual de estados de habitabilidad bajos a altos (Méndez, 2021). Algunos de los modelajes que se generan actualmente consideran aspectos como los pigmentos, tomando en cuenta los procesos de fotosíntesis. Como la fotosíntesis en la Tierra fue un proceso que permitió el desarrollo de la vida en la Tierra que pueden detectarse astronómicamente a escala global, un foco fuerte de la búsqueda de vida extrasolar sería la fotosíntesis [5].

La astrobiología cobró relevancia y reconocimiento internacional a finales de la década de 1950, ya que en ese momento se encontraban dos grupos de científicos designados a la búsqueda de “vida extraterrestre” por el gobierno estadounidense. A estos grupos se les llamaban proyectos





de Bioastronáutica, donde el enfoque era el desarrollo de dispositivos de abordaje y la búsqueda de vida en Marte. El primer grupo de científicos constituyeron el Panel 2 sobre Vida Extraterrestre del Comité Nacional de Bioastronáutica, presidido por Melvin Calvin, especialista en bioquímica y descubridor del ciclo de Calvin. Además de contar con la participación de Carl Sagan, uno de los más respetados divulgadores de la ciencia. El segundo grupo formaba el Panel sobre Vida Extraterrestre de la Academia Nacional de Ciencias, el cual era encabezado por Joshua Lederberg, premio Nobel de Medicina en 1958, destacado biólogo y genetista, área en la que realizó descubrimientos de genética bacteriana junto con su esposa Esther Lederberg.

Lederberg publicó en 1960 un artículo donde, por primera vez, se acuñó el término de exobiología para referirse a la biología de origen extraterrestre [6]. Años después, el propio Lederberg hace una aproximación más actualizada a lo que es la astrobiología, mencionando que el objetivo principal de la investigación astrobiológica es la comparación de los diferentes modelos de evolución química planetaria, haciendo énfasis en sus características dominantes. Con ello hace énfasis en que la exobiología no se limita a la posible vida fuera de la Tierra, sino también a la comprensión de la vida terrestre para el modelaje de la posible vida extraterrestre [7]. Un ejemplo de organismo terrestre que puede soportar condiciones extremas, tales como las que se pueden presentar en el espacio, son los tardígrados (Figura 1). Estos animales, cuentan con procesos de criptobiosis que les permiten tolerar condiciones de alta salinidad, radiación, desecación, etc., permaneciendo en estado de latencia hasta que las condiciones vuelvan a ser óptimas para cumplir su ciclo de vida, se han realizado estudios que indican a los tardígrados como un organismo modelo para la investigación astrobiológica, en 1964, se publicó un artículo titulado “Actions différentielles des rayons x et ultraviolets sur le tardigrade *Macrobiotus areolatus*”, donde



se planteó por primera vez a los tardígrados como posibles modelos para investigación espacial debido a su resistencia a la radiación [8]. Con esto el interés en los tardígrados como modelo aumentó. Por lo que en 2007 Jönsson, publicó un estudio proponiendo que los tardígrados pueden ser organismos modelo adecuados para estudios astrobiológicos debido a su resistencia a la deshidratación, tolerancia a temperaturas extremas y a la radiación, para esto se comparó con otros animales anhidrobióticos (que pueden estabilizarse en un estado de latencia por falta de agua), como las artemias o los quironómidos y los tardígrados mostraron una mayor resistencia a la radiación [9]. En el mismo año, se realizaron tres proyectos espaciales durante la misión FOTON-M3. El proyecto Tardigrade Resistance to Space Effects (TARSE) fue el primero, donde su objetivo era analizar el impacto del estrés ambiental, los rasgos de la historia de vida y los daños en el ADN a bordo de la nave espacial en *Paramacrobiotus richtersi*. En este proyecto, tardígrados activos y anhidrobióticos fueron expuestos a radiación en condiciones de microgravedad [10]. El segundo proyecto fue TARDIS (Tardigrada In Space). Su principal objetivo fue comprobar si los tardígrados de dos especies, *Milnesium tardigradum* y *Richtersius coronifer*, eran capaces de sobrevivir en condiciones de espacio abierto. Demostrando que los tardígrados pueden sobrevivir a la exposición al vacío espacial, sin embargo, factores como la radiación solar ultravioleta, radiación ionizante y radiación cósmica redujeron su tasa de supervivencia [11]. En el tercer proyecto RoTaRad (Rotifers, Tardigrades and Radiation), se examinaron los efectos sobre la supervivencia inicial, la supervivencia a largo plazo y la fecundidad de especies seleccionadas de tardígrados limnoterrestres así como de rotíferos en condiciones de estrés extremo (principalmente radiación) [12]. Estos estudios fueron relevantes en el área de la astrobiología ya que el proceso de criptobiosis permite una nueva visión ante como podría





comportarse la vida en otros planetas, manteniéndose en latencia hasta que las condiciones sean óptimas [13]. Con estos estudios enunciados se puede mostrar cómo ha evolucionado la investigación en la astrobiología y como es la investigación actual, sin embargo, en la década de 1980 seguía existiendo escepticismo. Hasta que en 1996, tras el descubrimiento de ALH80001 un meteorito de origen marciano que generó gran controversia ya que se especulaba contaba con la presencia de vida bacteriana, la NASA financió la realización de programas ambiciosos en astrobiología, con lo cual la astrobiología se desarrolló como una ciencia independiente de gran importancia en la investigación espacial, y se acotó a su concepción actual donde es definida como el estudio de los orígenes, distribución, y evolución de la vida en el universo [14].

Es importante recalcar que al igual que la NASA jugó un papel fundamental en el desarrollo de la astrobiología en Estados Unidos, esta área tuvo su desarrollo a lo largo del mundo. El desarrollo de la astrobiología en Iberoamérica partió como Joan Oró, bioquímico español y ganador de la medalla Oparin por la Sociedad Internacional para el Estudio del Origen de la Vida (ISSOL), sus aportaciones al área de la astrobiología ocurrieron durante la década de 1960 y fueron principalmente el descubrimiento de la síntesis de adenina a partir de ácido cianhídrico, la adenina es una de las cuatro bases del ADN con lo cual conocer su síntesis puede ser importante para hacer inferencias sobre donde se puede encontrar. Además de esto, Oró realizó investigaciones con la NASA, como el proyecto Apolo para análisis de las rocas y material de la Luna y en el proyecto Viking donde desarrolló experimentos para la busca de posibles microorganismos (los resultados no mostraron existencia de microorganismos en Marte) y el conocimiento de la superficie marciana. Y su aportación principal al área de la astrobiología fue el desarrollo de la Primera Escuela Iberoamericana de Astrobiología junto con Julián Chela Flores. En latinoamérica





se resaltan las aportaciones de Carlos María Varsavsky, Fernando Raúl Colomb y Guillermo Lemarchand, para el desarrollo de la astrobiología en Argentina. Varsavsky en 1968 publica el primer libro de un científico latinoamericano sobre búsqueda de vida inteligente en el universo además de dirigir el IAR (Instituto Argentino de Radioastronomía), Colomb participó como asistente de investigación de Frank Drake para la búsqueda de señales de vida inteligente en el NRAO (National Radio Astronomy Observatory), además de actuar como director del IAR (Instituto Argentino de Radioastronomía) y participar como divulgador en el área de astrobiología en Latinoamérica [15]. Guillermo Lemarchand fue director del programa SETI META II financiado por The Planetary Society en el Instituto de Radioastronomía de Argentina donde se buscan señales de vida inteligente en el universo, además de ser divulgador en el área y de publicar un libro de divulgación donde además documenta el desarrollo de la astrobiología en Latinoamérica “Astrobiología: del Big Bang a las civilizaciones” [16]. En México el desarrollo de la astrobiología ha sido bastante, con grandes exponentes como Rafael Navarro investigador mexicano que colaboró con la NASA en el Sample Analysis at Mars, con su trabajo, contribuyó a la identificación de compuestos orgánicos en el planeta rojo. También fue invitado a participar en el instrumento HABIT (Habitability, Brine Irradiation and Temperature) de la misión ExoMars de la Agencia Espacial Europea, un experimento diseñado para recolectar agua de la atmósfera de Marte. Otro gran exponente es Antonio Lazcano, biólogo evolutivo y representante en el área del origen de la vida, fue discípulo de Oparin y trabajó con Stanley Miller. Su trabajo impulsó la investigación sobre la temática del origen de la vida y la química prebiótica, además de participar como Presidente de la Sociedad Internacional sobre Estudios del Origen de la Vida (ISSOL) [15]. Una asociación mexicana representativa del área de astrobiología es el SOMA, es una sociedad civil que surgió





en 1998 bajo los cimientos de la Sociedad Mexicana de Ciencias de la Vida en el Espacio, los objetivos de SOMA son estudiar las ciencias interdisciplinarias relacionadas con la vida en la Tierra, así como otros cuerpos planetarios; establecer colaboraciones entre organismos nacionales e internacionales; crear cursos en disciplinas relacionadas con la astrobiología, y difundir la importancia de la astrobiología al público (particularmente a la juventud). SOMA se unió al Instituto de Astrobiología de la NASA (NAI) como miembro afiliado en 2012 [17].

## Conclusión

La astrobiología enfrentó retos en su desarrollo, pero ha logrado consolidarse como una novedosa rama en la investigación científica. Tratando de responder a preguntas importantes que la humanidad se ha planteado desde sus inicios, como lo serían las limitaciones que tiene la vida misma, o cómo se desarrollarían los organismos en ambientes interplanetarios que no presentan las condiciones a las que nosotros nos hemos habituado. En la actualidad esta área de la ciencia se ha planteado objetivos para un mayor progreso, consolidando en 2015 una estrategia para el desarrollo de la astrobiología por parte de la NASA [18]. Donde se establecieron objetivos de investigación financiados por la propia NASA. Recientemente en 2020 el Programa de Astrobiología de la NASA anunció la selección de ocho nuevos equipos de investigación interdisciplinarios, inaugurando el programa de Consorcios Interdisciplinarios para la Investigación de Astrobiología (ICAR). Estos equipos abarcan el espectro de la investigación en astrobiología, desde los orígenes cósmicos hasta la formación del sistema planetario, los orígenes y evolución de la vida y la búsqueda de vida más allá de la Tierra. México, por su lado, no se ha quedado atrás en investigaciones astrobiológicas. Gracias al SOMA se pueden estudiar y difundir más sobre esta ciencia. Así mismo, otro modelo (pues hay varios, no existen únicamente los



tardígrados) del que se pueden partir inferencias astrobiológicas, engloba a los organismos extremófilos, quienes no sólo soportan condiciones atmosféricas radicales, sino que también habitan en las mismas. Haciendo de las aguas termales, o formaciones acuosas ácidas, un dulce y cómodo hogar. Es así como la astrobiología ha logrado ser formalizada como un área de importancia actual además de contar con el financiamiento y la formación de programas con un enfoque para su desarrollo.



**Figura 1. Animación de un Tardigrado (*Mylnesium sp.*) Elaboración propia.**

## Referencias

- [1] C.F. Chyba & K.P. Hand, 2005. Astrobiology: The Study of the Living Universe. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 43(1), pp. 31-74. DOI:10.1146/annurev.astro.43-051804.102202





- [2] Luque, B., Ballesteros, F., Márquez, M., Agea, A., & Lara, L. (2009). *Astrobiología: Un puente entre el Big Bang y la vida*. Ediciones Akal.
- [3] V. Tejfel, 2009. Gavriil Adrianovich Tikhov (1875-1960) a pioneer in astrobiology. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 5(H15), pp. 720-721
- [4] V. Bazykine, 1960. The new science of astrobotany. *South African Journal of Science*, 56(19), pp. 229-231
- [5] N.Y. Kiang, A. Segura, G. Tinetti, R.E. Blankenship, M. Cohen, J. Siefert, ... & V.S. Meadows, 2007. Spectral signatures of photosynthesis II. Coevolution with other stars and the atmosphere of extrasolar worlds. *Astrobiology*, 7(1), pp. 252-274
- [6] J. Lederberg, 1960. Exobiology: approaches to life beyond the Earth. *Science* 132(3424), pp. 393-400
- [7] G.A. Lemarchand & G. Tancredi, 2010. Una breve historia social de la astrobiología en Iberoamérica. *Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería* 1, pp. 23-52
- [8] RM, May, 1964. Action différentielle des rayons x et ultraviolets sur le tardigrade *Macrobiotus areolatus*, a léétat actif et desséché. *Toto. Biol. Francia Bélgica*, 98, 349-367
- [9] Jonsson, KI, 2007. Los tardígrados como organismo modelo potencial en la investigación espacial. *Astrobiología*, 7(5), 757-766
- [10] Altiero, T., Guidetti, R., Caselli, V., Cesari, M., Rebecchi, L, 2011. Tolerancia a la radiación ultravioleta en eutardígrados hidratados y desecados. *Revista de Sistemática Zoológica e Investigación Evolutiva*, 49, 90-97
- [11] KI, Jonsson, E, Rabbow, RO, Schill, M, Harms-Ringdahl, P Rettberg, 2008. Los tardígrados sobreviven a la exposición al espacio en órbita terrestre baja. *Biología actual*, 18(17), R729-R731



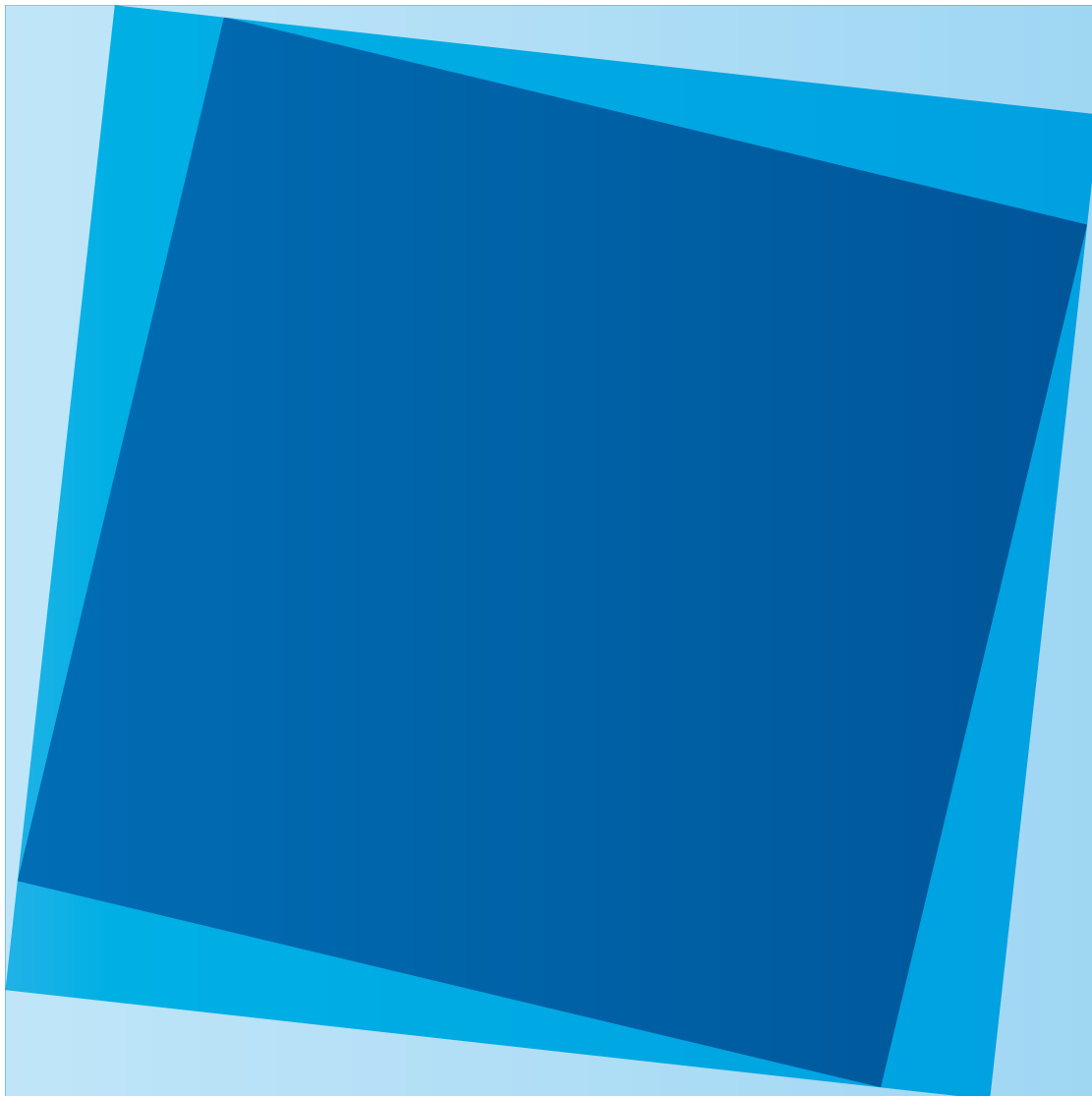
- [12] D. Persson, KA, Halberg, A, Jorgensen, C Ricci, N Mobjerg, RM Kristensen, 2011. Tolerancia al estrés extremo en tardígrados: condiciones espaciales sobrevivientes en órbita terrestre baja. *Revista de Sistemática Zoológica e Investigación Evolutiva* 49, 90-97
- [13] E. Weronika, & K Lukasz, 2017. Tardigrades in space research-past and future. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 47(4), 545-553
- [14] S.I. Ramírez & H. Terrazas, 2006. Astrobiología, una nueva disciplina científica. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos* (3), pp. 45-54
- [15] G.A. Lemarchand & G Tancredi (Eds), 2010. *Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones*. UNESCO
- [16] XC. Abrevaya, 2020. Breve historia de la astrobiología en Argentina. arXiv preprint arXiv:2010.13883
- [17] K. Cervantes de la Cruz, G. Cordero-Tercero, Y, Gómez Maqueo Chew, I. Lozada-Chávez, L. Montoya, SI Ramírez-Jiménez, A. Segura. 2020. Astrobiology and Planetary Sciences in Mexico. In *Astrobiology and Cuatro Ciénegas Basin as an Analog of Early Earth* (pp. 31-74). Springer, Cham.
- [18] Hays, L., Achenbach, L., Bailey, J., Barnes, R. K., Baroaa, J. A., Bertka, C., & Worsworth, R. D. (2015). *NASA Astrobiology Strategy 2015*. Retrieved from the NAI website [https://nai.nasa.gov/media/medialibrary/2015/10/NASA\\_Astrobiology\\_Strategy\\_2015\\_15100](https://nai.nasa.gov/media/medialibrary/2015/10/NASA_Astrobiology_Strategy_2015_15100), 8.

**Cómo citar este artículo:**

Valencia-Meza, A., & Ortiz Alegría, A. (2022). El desarrollo de la Astrobiología como ciencia: Astrobiología. *EPISTEMUS*, 16(33). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.214>



# ¿Hacia una nueva Ilustración? Una década trascendente



**La última década y el futuro de la  
cosmología y la astrofísica**

Martin Rees



**Martin Rees**  
University of Cambridge

Martin Rees es cosmólogo y científico espacial. Estudió en la Universidad de Cambridge, a la que regresó como profesor después de desempeñar varios puestos dentro y fuera de Reino Unido. Es director del Instituto de Astronomía y rector del Trinity College. Sus aportaciones nos han ayudado a entender mejor fenómenos como la formación de galaxias, los agujeros negros, la energía del cosmos y el concepto de multiverso. Sus investigaciones han sido reconocidas internacionalmente. Como miembro de la Cámara de los Lores británica, presidente de la Royal Society (entre 2005-2010) y miembro de la Academia de Ciencias de Reino Unido y la Commonwealth, ha participado en la elaboración de políticas científicas. A sus investigaciones suma la labor de divulgador científico en libros y conferencias. Es autor de ocho libros, el más reciente de los cuales es *On the Future* [Sobre el futuro] (Princeton, Princeton University Press, 2018).

Libros recomendados: Rees, Martin (2012): *Universe* [Universo], Londres, Dorling Kindersley; Rees, Martin (2018), *On the Future*, Princeton, Princeton University Press

**En la última década se han hecho progresos espectaculares en la exploración del cosmos. Los hitos incluyen estudios detallados de los planetas y lunas de nuestro sistema solar y la constatación (más espectacular aún), de que la mayoría de las estrellas están orbitadas por planetas y de que en nuestra galaxia hay millones de planetas similares a la Tierra. A una escala todavía mayor, hemos mejorado nuestro entendimiento de cómo se han desarrollado las galaxias a lo largo de 1.380 millones de años de historia cósmica, desde las fluctuaciones primigenias. Es posible que estas fluctuaciones se generaran por efectos cuánticos cuando todo el cosmos era de tamaño microscópico. La teoría de Einstein se vio de nuevo confirmada con la detección de la onda gravitacional, un monumental logro tecnológico. Los avances futuros dependerán de la disponibilidad de instrumentos más potentes, que podrían arrojar pruebas de que hay vida en los exoplanetas y brindar una mejor comprensión del *big bang*, el hecho científico por excelencia de nuestro cosmos.**

## Introducción

La astronomía es la más ambiciosa de las ciencias ambientales y la más universal: el cielo es, de hecho, el único elemento de nuestro entorno común que ha maravillado por igual a todas las culturas a lo largo de la historia. Hoy es un campo de estudio que comprende una amplia variedad de disciplinas: matemáticas, física e ingeniería, por supuesto. Pero también otras.

Los astrónomos buscamos cartografiar y examinar las distintas entidades —planetas, estrellas, galaxias, agujeros negros, etcétera— presentes en el cosmos. A continuación usamos nuestros conocimientos de física para intentar comprender los objetos exóticos que revelan nuestros telescopios. Un objetivo más ambicioso es comprender cómo el cosmos en su totalidad, del que somos parte, surgió de los inicios densos y ardientes del universo.

El ritmo de progreso se ha acelerado antes que ralentizado; los instrumentos y la capacidad informática han mejorado de manera inmensa y veloz. En la última década en concreto se han producido avances asombrosos. Y la promesa del futuro es más esplendorosa aún: la astronomía brinda excelentes oportunidades a los jóvenes investigadores que quieren entrar en un campo vibrante.

En este capítulo me centraré en tres temas: en primer lugar, los planetas y exoplanetas relativamente «locales» a una escala cósmica; en segundo, en la gravedad y los agujeros negros del ámbito extragaláctico, y en tercer y más hipotético lugar, en algunos conceptos que buscan comprender el cosmos en su totalidad.

## Planetas, exoplanetas y vida

Los vuelos espaciales humanos han languidecido hasta cierto punto desde aquellos años en los que quienes hoy somos de mediana edad nos sentimos inspirados por el programa *Apollo* y los aterrizajes en la Luna.

Pero en lo referido a comunicación, monitorización ambiental, navegación por satélite, etcétera, la tecnología espacial ha madurado. Dependemos de ella cada día. Y para los astrónomos ha abierto nuevas «ventanas»: telescopios en el espacio nos muestran un remoto cielo de rayos infrarrojos, UVA, X y gamma. Aunque los seres humanos no se han aventurado más allá de la Luna, sondas no tripuladas a otros planetas nos han devuelto imágenes de mundos variados y peculiares.

Entre los momentos estelares de la pasada década, la misión Rossetta de la Agencia Espacial Europea logró aterrizar una pequeña sonda alrededor de un cometa para comprobar, por ejemplo, que las mediciones isotópicas del hielo del cometa eran las mismas que las del agua de la Tierra. Esto es crucial para averiguar el origen de esa agua. La sonda New Horizons de la NASA ha dejado ya atrás Plutón y se dirige ahora al cinturón Kuiper, repleto de planetas menores.

Rossetta tardó cerca de diez años en llegar a su destino y fueron necesarios casi otros diez para planearla y construirla. Su tecnología robótica data de la década de 1990, lo que es fuente de gran frustración para el equipo que desarrolló el proyecto, porque los diseños actuales tendrían capacidades mayores. Lo mismo puede decirse de New Horizons, que sin embargo nos devolvió imágenes en alta definición de Plutón, diez mil veces más lejos de la Tierra que la Luna. Y la sonda Cassini, que estuvo trece años explorando Saturno y sus lunas, es más antigua todavía: entre su lanzamiento y su llegada a Saturno, a finales de 2017, transcurrieron veinte años.

Sabemos cómo han cambiado los teléfonos móviles en los últimos quince o veinte años, así que imaginemos lo sofisticado que puede llegar a ser hoy la continuación de estas misio-







nes. Durante este siglo el sistema solar en su totalidad —los planetas, las lunas y los asteroides— serán explorados y cartografiados por flotillas de diminutas tripulaciones robóticas que interactuarán igual que bandadas de pájaros. Fabricadores robóticos gigantes serán capaces de construir, en el espacio, inmensos captadores solares y otros artefactos. Los sucesores del telescopio Hubble, con enormes espejos tan delgados como una gasa ensamblados en gravedad cero, ampliarán aún más nuestra visión de las estrellas, las galaxias y el cosmos en general. El paso siguiente podría ser la minería y fabricación espacial (y fabricar en el espacio supondría un uso más eficiente de los materiales extraídos de asteroides que traerlos hasta la Tierra).

Serán robots, no seres humanos, los que construirán estructuras gigantescas en el espacio. Y estos sofisticados robots explorarán planetas exteriores; tendrán que emplear técnicas de aprendizaje profundo e inteligencia artificial para tomar decisiones autónomas: el tiempo que tarda en viajar una señal de radio a los planetas exteriores se mide en horas, e incluso días, así que el control directo desde la Tierra no es posible. Estos robots serán humanoides. Los humanos están adaptados al entorno de la Tierra. Para la gravedad de Plutón o de los asteroides, en cambio, sería más práctica una apariencia más arácnida.

Pero ¿habrá un papel para los humanos en estas empresas? No se puede negar que *Curiosity*, el vehículo de la NASA del tamaño de un coche pequeño que lleva recorriendo los cráteres de Marte desde 2011 puede pasar por alto importantes descubrimientos que sí detectaría un geólogo humano. El aprendizaje de las máquinas avanza a gran velocidad, lo mismo que la tecnología por sensores; sin embargo, la diferencia de costes entre misiones tripuladas y no tripuladas sigue siendo abismal.

Los avances en robótica sin duda reducirán la necesidad de viajes espaciales tripulados por humanos. No obstante tengo la esperanza de que a los robots los sigan hombres, aunque habrán de ser aventureros movidos por el amor al peligro antes que por un objetivo práctico. Los avances más prometedores están impulsados por compañías privadas. Por ejemplo, SpaceX, liderado por Elon Musk, que también fabrica los coches eléctricos de Tesla, ha lanzado cohetes con carga útil sin tripular y que se han acoplado con la estación espacial. Musk confía en poder ofrecer pronto viajes orbitales a pasajeros de pago.

## **Serán robots, no seres humanos, los que construirán estructuras gigantescas en el espacio. Y estos sofisticados robots explorarán planetas exteriores; tendrán que emplear técnicas de conocimiento profundo e inteligencia artificial para tomar decisiones autónomas**

De hecho, creo que el futuro de los viajes espaciales tripulados, incluso a Marte, está en manos de aventureros con financiación privada, preparados para participar en programas de bajo coste mucho más arriesgados de los que autorizaría ningún gobierno con participación de civiles, quizá incluso viajes solo de ida (La expresión «turismo espacial» debe sin duda evitarse. Anima a la gente a creer que emprendimientos de estas características son algo rutinario y poco peligroso y, de ser esa la percepción, los inevitables accidentes serán tan traumáticos como lo fueron los del transbordador espacial estadounidense. En lugar de ello, estas aventuras de bajo coste deben «venderse» como deportes peligrosos o exploraciones intrépidas).

Para 2100 es posible que grupos de pioneros hayan establecido bases independientes de la Tierra, en Marte o quizá en asteroides. Pero no debemos esperar emigraciones en masa de la Tierra. Ningún punto de nuestro sistema solar cuenta con un entorno tan clemente como

la Antártida o la cima del Everest. El espacio no es una solución a los problemas de la Tierra. Abordar el cambio climático en la Tierra es un juego de niños comparado con la terraformación de Marte.

¿Cuáles son las esperanzas a largo plazo de los viajes espaciales? El obstáculo crucial ahora mismo deriva de la ineficiencia intrínseca del combustible químico, que obliga a transportar una carga de combustible que excede con mucho la carga útil. Pero mientras dependamos de combustibles químicos, los viajes interplanetarios seguirán siendo un desafío. Un ascensor espacial ayudaría. Y la energía nuclear podría ser transformadora. Al permitir velocidades mucho mayores, recortaría de manera drástica los tiempos necesarios para llegar a Marte o a los asteroides (reduciendo no solo el aburrimiento de los astronautas, también su exposición a radiaciones nocivas).

La pregunta que con mayor frecuencia se hace a los astronautas es: «¿Hay vida ahí fuera? ¿Qué pasa con los extraterrestres de la ciencia ficción?». En este sentido, el panorama en nuestro sistema solar se presenta desolador, aunque el descubrimiento de formas de vida siquiera muy vestigiales —en Marte, en océanos bajo el hielo de Europa (una de las lunas de Júpiter) o en Encélado (una luna de Saturno)— sería de crucial importancia, sobre todo si se demostrara que esta vida tiene un origen independiente.

Pero las perspectivas mejoran si ampliamos nuestro horizonte a otras estrellas, mucho más allá del alcance que cualquier sonda actual permite imaginar. Ahora mismo el tema candente en astronomía es la constatación de que muchas otras estrellas —quizá incluso la mayoría de ellas— cuentan con un séquito de planetas que orbitan a su alrededor, lo mismo que el Sol. Estos planetas no se han observado directamente, pero su existencia se deduce a partir de mediciones precisas de su estrella anfitriona. Existen dos métodos:

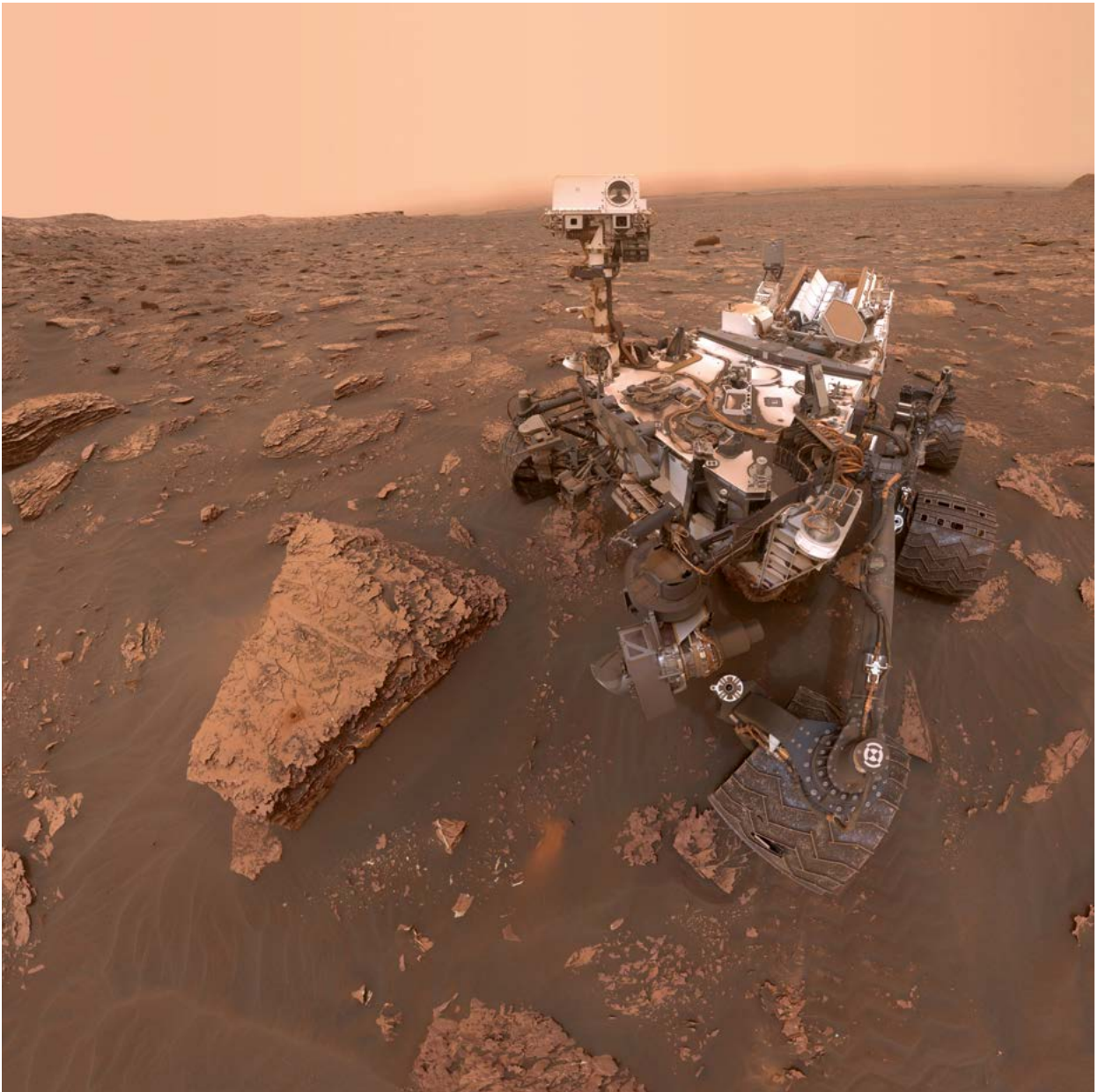
1. Si la estrella tiene un planeta orbitando a su alrededor, entonces tanto el planeta como la estrella se mueven alrededor de su centro de masa, el baricentro. La estrella, al ser de mayor tamaño, se mueve más despacio. Pero los diminutos cambios periódicos en el efecto Doppler de las estrellas pueden detectarse con un espectroscopio de alta precisión. A estas alturas se ha deducido con este método la existencia de más de quinientos planetas exosolares. Podemos inferir su masa, la longitud de su «año» y la forma de su órbita. Esta información se limita a planetas «gigantes», objetos del tamaño de Saturno o de Júpiter. Detectar planetas semejantes a la Tierra, es decir, cientos de veces más pequeños, es extremadamente difícil, puesto que provocan movimientos de meros centímetros por segundo en su estrella anfitriona.

2. Existe una segunda técnica que funciona mejor con planetas de menores dimensiones. Una estrella se atenúa levemente cuando un planeta «transita» delante de ella. Un planeta del tamaño de la Tierra que transitara delante de una estrella similar al Sol causaría un oscurecimiento mínimo, de cerca de una parte por cada 10.000, que se repetiría una vez cada órbita. La nave espacial Kepler estuvo más de tres años apuntando a un área de cielo de 7 grados de diámetro, registrando la luminosidad de más de 150.000 estrellas, al menos dos veces cada hora, con una precisión de una parte por cada 100.000. Ha encontrado más de 2.000 planetas, muchos de ellos no mayores que la Tierra. Y por supuesto solo detecta el tránsito de aquellos cuyo plano orbital casi coincide con nuestra línea de visión. Nos interesan de modo especial posibles «gemelos» de la Tierra, planetas del mismo tamaño que el nuestro, en órbitas con temperaturas en las que el agua ni hierva ni esté siempre congelada. Ya se han identificado algunos en la muestra tomada, lo que sugiere que en la galaxia hay miles de millones de planetas similares a la Tierra.





Por lo tanto, el robot explorador de la NASA Curiosity, el cual se lanzó el 25 de noviembre de 2011, es el primer robot que ha sido enviado a Marte. Este robot ha sido diseñado para explorar el planeta rojo y buscar signos de vida. El robot Curiosity también es capaz de realizar experimentos científicos y de tomar fotografías de su entorno. Este robot ha sido diseñado para durar al menos dos años en Marte, pero se espera que pueda durar mucho más tiempo. El robot Curiosity es el más grande y más sofisticado de los robots que han sido enviados a Marte. Este robot ha sido diseñado para explorar el planeta rojo y buscar signos de vida. Este robot ha sido diseñado para durar al menos dos años en Marte, pero se espera que pueda durar mucho más tiempo. El robot Curiosity es el más grande y más sofisticado de los robots que han sido enviados a Marte.





El verdadero reto es ver los planetas directamente, en lugar de deducir su existencia a partir de su estrella anfitriona. Pero eso es difícil. Para ilustrar la dificultad, imaginemos un astrónomo extraterrestre observando la Tierra con un telescopio desde (digamos) 30 años luz, la distancia a que está una estrella cercana. Nuestro planeta sería, en palabras de Carl Sagan «un punto azul pálido»,<sup>1</sup> muy cercano a una estrella (nuestro Sol) que tiene un resplandor miles de millones de veces mayor que él: como una luciérnaga comparada con una linterna. El tono de azul variaría ligeramente dependiendo de si lo que estaba delante era el océano Pacífico o la masa terrestre de Eurasia. Los astrónomos alienígenas deducirían la duración de nuestro «día», las estaciones, la topografía general y el clima. Al analizar esa luz tenue, deducirían que tenía una biosfera.

En un plazo de diez a quince años, el Telescopio Extremadamente Grande (ELT, por sus siglas en inglés) que está construyendo el Observatorio Europeo del Sur en una montaña de Chile con un espejo principal segmentado de 39 metros de diámetro, hará deducciones de este tipo respecto a planetas del tamaño de nuestra Tierra que orbiten alrededor de estrellas similares a nuestro Sol. Pero lo que la mayoría de la gente quiere saber es: ¿Podría haber en ellos vida? ¿Vida inteligente incluso? A este respecto, seguimos aún en el ámbito de la ciencia ficción.

Sabemos demasiado poco de cómo empezó la vida en la Tierra para formular hipótesis fiables. ¿Qué desencadenó la transición de moléculas complejas a entidades capaces de metabolizar y reproducirse? Es posible que interviniera un azar tan anómalo que solo se ha dado una vez en toda la galaxia. Por otro lado, esta transición crucial pudo ser casi inevitable, dado lo «favorable» del entorno. Lo cierto es que lo desconocemos, como tampoco sabemos si la composición química ADN-ARN de la vida terrestre es la única posibilidad, o solo una base química de entre muchas posibles que podrían darse en otra parte.

Más aún, incluso si existe vida simple, no podemos calcular las posibilidades que tiene de evolucionar a una biosfera compleja. E incluso si lo hiciera, podría ser distinta, hasta el punto de resultar indetectable. No quiero hacerme demasiadas ilusiones, pero el programa de Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre (SETI, por sus siglas en inglés) es una apuesta que merece la pena, porque, de tener éxito, nos traería el estimulante mensaje de que los conceptos de lógica y física no se limitan a lo que puede contener el cerebro humano.

## **Ahora mismo el tema candente en astronomía es la constatación de que muchas otras estrellas —quizá incluso la mayoría de ellas— cuentan con un séquito de planetas que orbitan a su alrededor, lo mismo que el Sol**

Y, por cierto, es demasiado antropocéntrico limitar el interés a planetas similares a la Tierra, aunque empezar por ellos sea una estrategia prudente. Los autores de ciencia ficción tienen ideas distintas: criaturas semejantes de globos que flotan en las densas atmósferas de planetas tipo Júpiter, enjambres de insectos inteligentes, etcétera. Quizá la vida pueda prosperar incluso en un planeta catapultado a la gélida oscuridad del espacio interestelar, cuya principal fuente de calor procede de radioactividad interna (el proceso que calienta el núcleo terrestre). También deberíamos tener en cuenta que señales en apariencia artificiales podrían proceder de ordenadores superinteligentes (aunque no necesariamente conscientes), creados por una raza de seres alienígenas ya extinta. De hecho, esta es la hipótesis más viable.



Es posible que en este siglo averigüemos si la evolución biológica es algo exclusivo de nuestra Tierra o si el cosmos en su totalidad rebosa de vida, de inteligencia incluso. No podemos calcular las probabilidades de que esto ocurra. Incluso si la vida simple está extendida, sus probabilidades de evolucionar a algo que podemos identificar como inteligente o complejo es algo bien distinto. Podría ocurrir a menudo. O casi nunca. Esta última opción sería deprimente para los investigadores. Pero nos permitiría ser menos modestos desde un punto de vista cósmico: la Tierra, aunque diminuta, podría ser la entidad más compleja e interesante de toda la Galaxia.

El Telescopio Extremadamente Largo descubrirá exoplanetas, pero solo como puntos de luz. Pero para mediados de siglo es posible que haya espejos gigantes en el espacio capaces de proporcionarnos una imagen de mundos del tamaño de nuestra Tierra orbitando otra estrella. Quizá haya en ellos indicios de vegetación o de otra forma de vida. Hemos tenido, desde 1968, la famosa imagen —icónica entre los ambientalistas desde entonces— de nuestra Tierra tomada por los astronautas del *Apollo* orbitando la Luna. Quizá para cuando llegue su centenario, en 2068, tengamos una imagen aún más asombrosa: la de otra Tierra, es posible incluso que con biosfera.

### Gravedad fuerte y el cosmos a gran escala

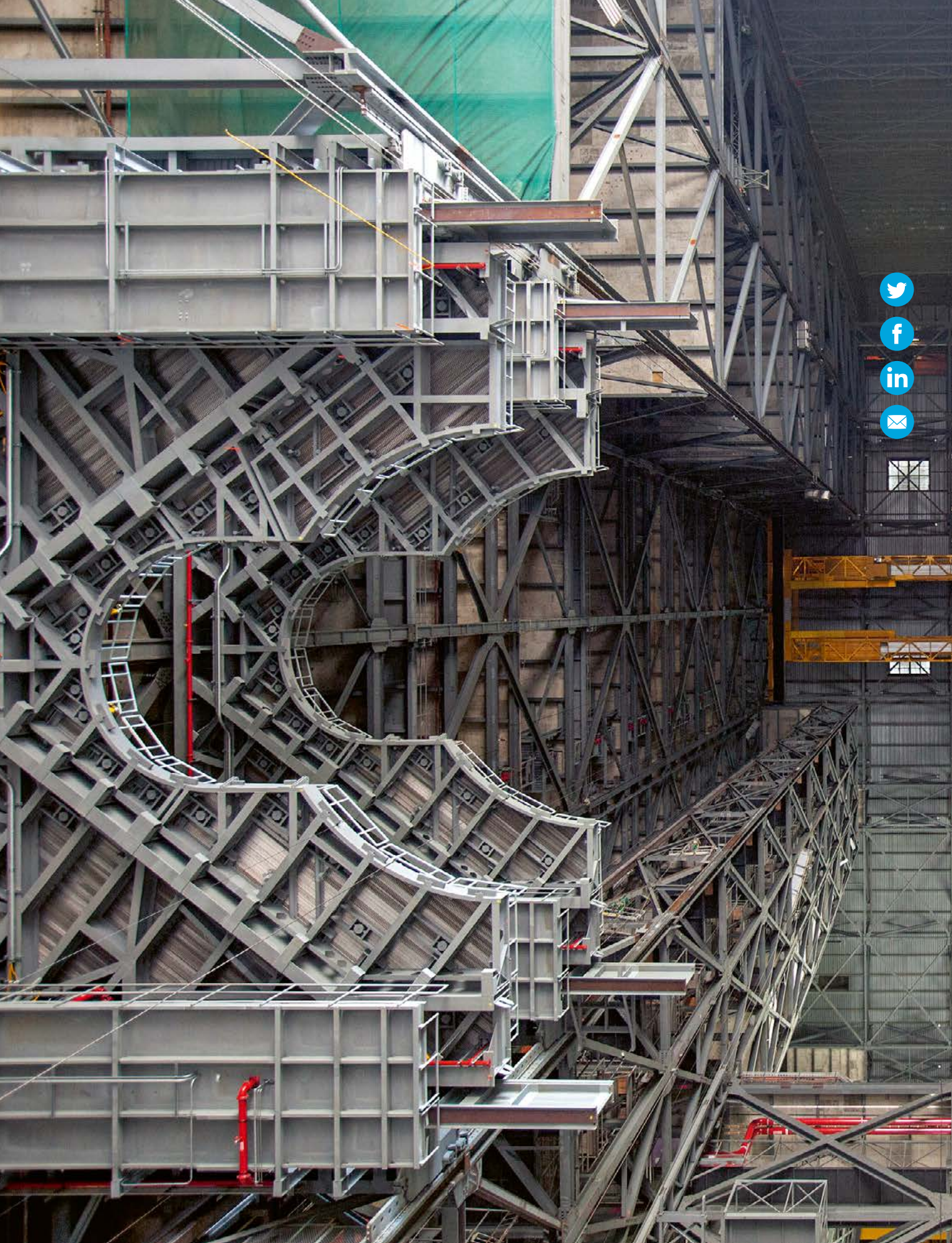
Vayamos ahora al mundo, mucho más sencillo e inanimado, de la física y la química. Lo que más ha sorprendido de los sistemas planetarios recién descubiertos es su gran variedad. No nos ha sorprendido, en cambio, la ubicuidad de los exoplanetas. Hemos aprendido que las estrellas se forman mediante la contracción de nubes de gas y polvo; y si la nube tiene algún tipo de impulso angular, rotará a la misma velocidad a la que se contrae y saldrá de ella un disco polvoriento que girará alrededor de la protoestrella. En este disco, el gas se condensará en las partes exteriores, más frías; en las zonas más cercanas al polvo menos volátil, se aglomerará hasta formar rocas y planetas. Este debería ser el proceso genérico de la mayoría de protoestrellas.

La fuerza crucial que permite que se formen las estrellas y mantiene a los planetas en órbita a su alrededor es, por supuesto, la fuerza de la gravedad. Y la descripción más precisa del comportamiento de la gravedad hay que buscarla en la teoría de la relatividad de Einstein. Einstein no «destronó» a Newton, pero su teoría tenía una aplicación más amplia que la de este y ofrecía una comprensión más profunda de la gravedad en términos de espacio y tiempo. En palabras del gran físico J. A. Wheeler, «El espacio le dice a la materia cómo moverse; la materia le dice al espacio cómo curvarse».<sup>2</sup> Esta magnífica teoría se propuso en 1915, pero durante los cincuenta años siguientes a su descubrimiento la relatividad estuvo de alguna manera aislada de la física y la astronomía convencionales. Los efectos gravitacionales que gobiernan las estrellas y las galaxias corrientes eran tan débiles que podían describirse mediante la teoría newtoniana. La relatividad general no era más que una enmienda minúscula.

Esta situación cambió en 1963 con el descubrimiento de los cuásares, cuerpos hiperluminosos situados en el centro de algunas galaxias, lo bastante compactos para variar en horas o días, pero que brillan mucho más que su galaxia anfitriona. Los cuásares revelaron que las galaxias contenían algo más que estrellas. Ese «algo» es un inmenso agujero negro situado en su centro. Los cuásares son tan brillantes porque, tal y como ahora sabemos, reciben energía de la emisión de gas magnetizado que se desplaza en un remolino hacia un agujero negro central.

Los cuásares fueron un importante estímulo para el nacimiento de la «astrofísica relativista», pero no el único. En concreto, otra sorpresa fue la detección de estrellas de neutrones.









**La expansión cósmica puede continuar incluso tras la muerte del Sol. La hipótesis más probable es que tenemos por delante casi una eternidad: un cosmos más frío y más vacío todavía**

Bahía Principal 3 dentro del Edificio de Ensamblaje de Vehículos del Centro Espacial Kennedy de la NASA, en Florida, Estados Unidos. La plataforma recién instalada completará el segundo de los diez niveles de plataformas de trabajo que rodearán y darán acceso al cohete SLS y la nave espacial *Orión* para la Misión de Exploración 1





Otro de los objetos mejor conocidos del cielo es la Nebulosa del Cangrejo: restos en expansión de una supernova identificados por astrónomos chinos en el 1054 d.C. Durante mucho tiempo fue un rompecabezas sin resolver que no dejaba de brillar, azul y reluciente. La respuesta llegó cuando se descubrió que la estrella de aspecto inocuo que había en su centro era cualquier cosa menos normal. En realidad se trataba de una estrella de neutrones que giraba a 30 revoluciones por segundo y emitía un viento de electrones rápidos, responsable de generar la luz azul. En las estrellas de neutrones, los efectos de la relatividad son del 10-20%, lo que supone algo más que una minúscula enmienda a la teoría de Newton.

Las supernovas son de crucial importancia para nosotros; de no ser por ellas no estaríamos aquí. Para cuando concluye la vida de una estrella gigante, la fusión nuclear ha dado lugar a una estructura de piel de cebolla, con capas interiores más calientes en puntos cada vez más altos de la tabla periódica. Este material sale despedido durante la explosión de la supernova. La basura espacial a continuación se mezcla en el medio interestelar y se recondensa en nuevas estrellas orbitadas por planetas.

El concepto lo desarrollaron primero Fred Hoyle y sus colaboradores. Analizaron las reacciones nucleares específicas del proceso y lograron comprender cómo habían nacido la mayoría de los átomos de la tabla periódica y por qué el oxígeno y el carbono (por ejemplo) son abundantes, mientras que el oro y el uranio escasean. Algunos elementos se forman en entornos más exóticos, por ejemplo, el oro se forma en las colisiones cataclísmicas de estrellas de neutrones, un fenómeno que no se observó hasta 2017, cuando una señal de onda gravitacional, interpretada como la fusión de dos estrellas de neutrones, se observó mediante telescopios que detectaron el fenómeno en muchas bandas distintas.

Nuestra galaxia es un gigantesco sistema ecológico donde el gas se recicla mediante generaciones sucesivas de estrellas. Cada uno de nosotros contenemos átomos forjados en docenas de estrellas distintas dispersas por la Vía Láctea que vivieron y murieron hace más de 4.500 millones de años contaminando la nube interestelar en la que se condensó el sistema solar.

En la década de 1960 se hicieron por primera vez verdaderos progresos en la comprensión de los agujeros negros desde que Julius Robert Oppenheimer y sus colaboradores aclararon, a finales de la de 1930, lo que ocurre cuando algo cae en un agujero negro y desaparece del mundo exterior (y es interesante hacer conjeturas sobre cuánto habría avanzado el trabajo de Oppenheimer si la Segunda Guerra Mundial no hubiera estallado exactamente el mismo día, el 1 de septiembre de 1939, que se publicó su artículo en *Physical Review*).

Los teóricos de la década de 1960 se sorprendieron cuando sus cálculos demostraron que todos los agujeros negros que se habían instalado en un estado estacionario eran objetos «estándares», definidos tan solo por dos números: su masa y su momento cinético. Ningún otro parámetro. Esta constatación impresionó mucho al gran teórico Subrahmanyan Chandrasekhar, quien escribió: «En toda mi vida científica, la experiencia más abrumadora ha sido constatar que la solución exacta a las ecuaciones de Einstein [...] proporciona la representación absolutamente exacta del número incalculable de agujeros negros que pueblan el universo».<sup>3</sup>

En el centro de la mayoría de las galaxias hay un cuásar muerto: un gigantesco agujero negro inactivo. Lo que es más, existe una correlación entre la masa del agujero y la de su galaxia anfitriona. Nuestra galaxia alberga un agujero de alrededor de cuatro millones de masas solares, un tamaño modesto comparado con los agujeros que hay en el centro de gigantescas galaxias elípticas, que pesan miles de millones de masas solares.

Einstein saltó a la fama mundial en 1919. El 29 de mayo de ese año hubo un eclipse solar. Un grupo encabezado por el astrónomo de Cambridge Arthur Eddington observó que durante el eclipse aparecían estrellas cerca del Sol. Las mediciones mostraban que dichas estrellas eran desplazadas de sus ubicaciones habituales y que la gravedad de Sol curvaba la trayectoria de su





luz. Esto confirmaba una de las predicciones clave de Einstein. Cuando se informó de los resultados a la Royal Society londinense, la prensa mundial difundió la noticia. «El cielo se llena de estrellas torcidas; Newton ha sido destronado»<sup>4</sup> fue el desmesurado titular de *The New York Times*.

Y en febrero de 2016, casi cien años más tarde, se produjo otro anuncio igual de crucial, esta vez desde el Club de la Prensa de Washington, que proporcionaba la defensa más reciente y sólida de la teoría de Einstein. Se trataba de la detección de ondas gravitacionales por parte del Observatorio de Interferometría Láser de Ondas gravitacionales (LIGO, por sus siglas en inglés). Einstein había concebido la fuerza gravitatoria como una «curvatura» del espacio. Cuando los objetos gravitatorios cambian de forma, generan perturbaciones. Cuando una de estas perturbaciones atraviesa la Tierra, el espacio de alrededor «vibra»: se estira y se contrae alternativamente a medida que lo cruzan las ondas gravitacionales. Pero el efecto es minúsculo. Por esta razón, básicamente, la gravedad es una fuerza tan débil. La fuerza gravitatoria entre objetos de la vida diaria es diminuta. Si movemos dos mancuernas emitiremos ondas gravitacionales, pero de potencia infinitesimal. Ni siquiera planetas que orbitan alrededor de estrellas o parejas de planetas que orbitan uno alrededor del otro emiten a un nivel detectable.

## **En febrero de 2016 se produjo un anuncio crucial: la detección de ondas gravitacionales por parte del Observatorio de Interferometría Láser de Ondas Gravitacionales (LIGO) que proporcionaba la defensa más reciente y sólida de la teoría de Einstein**

Los astrónomos coinciden en que las fuentes que el LIGO pueda detectar deben tener una gravedad mucho mayor que la de los planetas y estrellas corrientes. Los candidatos más probables son los agujeros negros y las estrellas de neutrones. Si dos agujeros negros forman un sistema binario, poco a poco empezarán a girar juntos. A medida que se acercan, el espacio que los rodea se va distorsionando hasta que se fusionan en un único agujero rotatorio. Este agujero se bambolea y «silba», generando nuevas ondas hasta que se estabiliza, convertido en un único agujero negro estático. Este «chirrido», una sacudida del espacio que se acelera y cobra fuerza hasta el momento de la fusión, y a continuación muere, es lo que detecta el LIGO. Estos cataclismos ocurren menos de una vez en un millón de años en nuestra galaxia. Pero aunque se produzcan a una distancia de miles de millones de años luz, emitirían una señal detectable por el LIGO y hay millones de galaxias que están más cerca que eso.

Detectar los fenómenos más importantes requiere instrumentos asombrosamente sensibles y muy costosos. En los detectores LIGO, rayos láser de gran intensidad se proyectan a lo largo de brazos de cuatro kilómetros de longitud y se reflejan en espejos situados al final de ellos. Analizando los rayos de luz, es posible detectar cambios en la distancia entre los espejos, que aumenta y decrece a medida que el «espacio» se expande y se contrae. La magnitud de esta vibración es pequeñísima, de alrededor de 0,000000000001 centímetros, es decir, millones de veces menor que un átomo. El proyecto del LIGO prevé dos detectores similares separados entre sí unos tres mil kilómetros, uno en el estado de Washington, el otro en Luisiana. Un único detector podría registrar acontecimientos microsísmicos, tráfico de vehículos, etcétera, y con objeto de excluir estas falsas alarmas, los experimentadores tomarán nota solo de los acontecimientos que aparezcan en los dos detectores.



Esta detección es de suma importancia, uno de los grandes descubrimientos de la década. El escepticismo residual sobre la validez de las ecuaciones de Einstein se disipó cuando LIGO detectó acontecimientos atribuibles a la fusión de dos agujeros negros. Los «chirridos» detectados, complejos patrones de oscilaciones, encajan a la perfección en modelos computacionales basados en la teoría de Einstein.

Los agujeros detectados por LIGO suman hasta 30 masas solares, restos de estrellas de gran tamaño. Pero se esperan acontecimientos aún más enérgicos. Cuando se fusionen dos galaxias (tal y como harán Andrómeda y la Vía Láctea dentro de aproximadamente 4.000 millones de años), los agujeros negros en el centro de las mismas orbitarán juntos en espiral formando un sistema binario, que se encogerá liberando radiación gravitacional y emitirá un fuerte chirrido cuando los dos agujeros se fusionen. La mayoría de las galaxias han crecido mediante una sucesión de fusiones y adquisiciones. Las coalescencias fruto de estos agujeros negros supergigantes pueden liberar ondas gravitacionales de frecuencias mucho más bajas de las que pueden captar detectores terrestres como LIGO. Pero hay acontecimientos de primer orden a los que sí podrían ser sensibles detectores orbitando en el espacio. Y la ESA tiene un proyecto llamado LISA destinado a detectar estas poderosas «alteraciones» de baja frecuencia en el espacio-tiempo.

#### Más allá de las galaxias. Horizontes cósmicos

Sabemos que las galaxias —con forma de disco algunas, similares a nuestra Vía Láctea o a Andrómeda, otras «elipses» amorfas— son los componentes básicos de nuestro universo en expansión. Pero ¿hasta qué punto podemos en realidad comprender de esas galaxias? Los físicos que estudian las partículas pueden testarlas y hacerlas chocar en aceleradores del CERN. Los astrónomos no pueden hacer chocar galaxias. Y las galaxias cambian tan despacio que, en el transcurso de una vida humana, solo vemos una instantánea de cada una. Pero ya disponemos de opciones: podemos llevar a cabo experimentos en un «universo virtual» mediante simulaciones informáticas que incorporan gravedad y dinámica de gases.

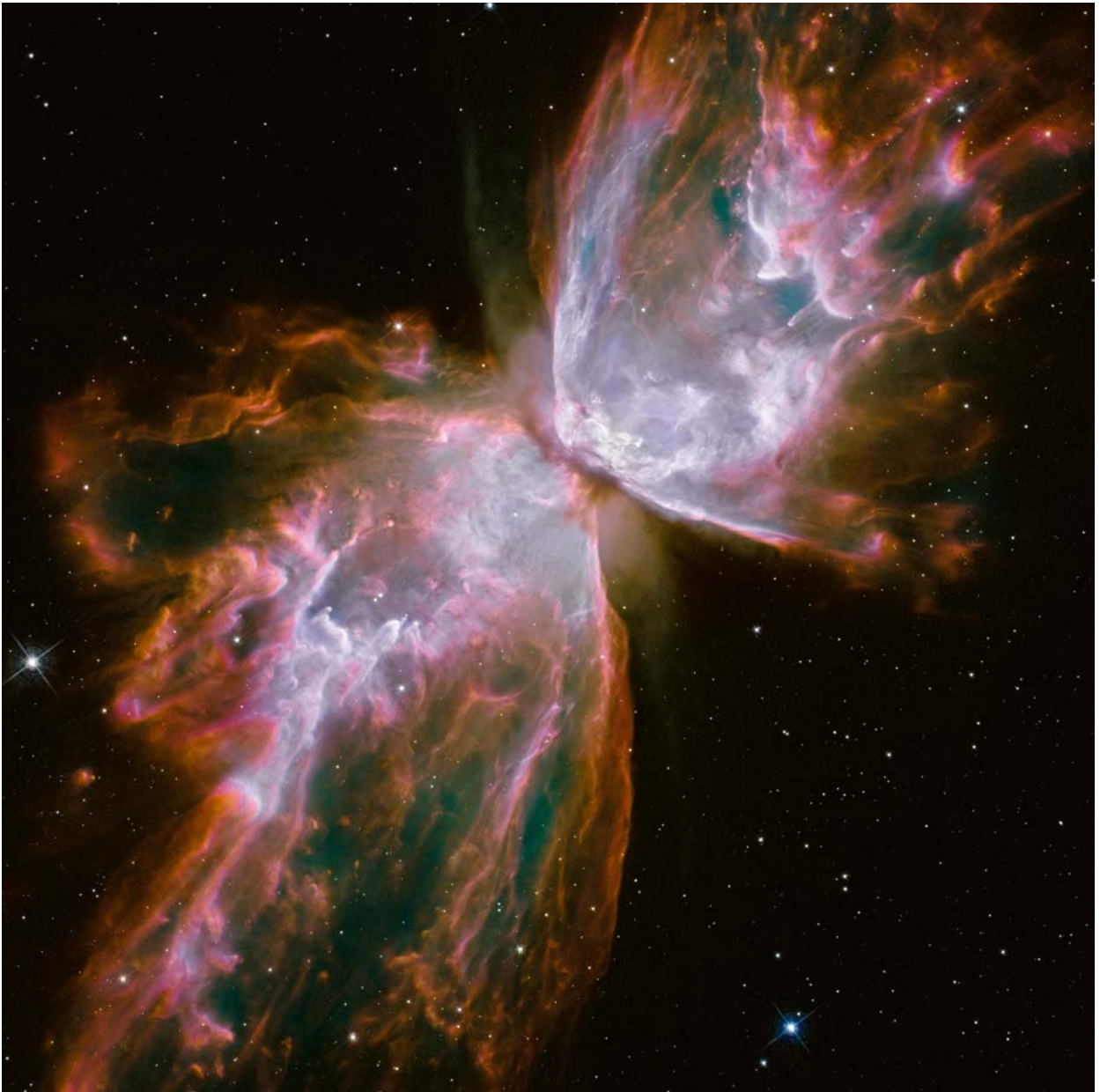
Podemos rehacer estas simulaciones partiendo de distintas hipótesis respecto a la masa de estrellas y gas de cada galaxia, etcétera, y ver cuáles casan mejor con los datos. Lo importante es que este y otros métodos nos permiten descubrir que todas las galaxias se mantienen unidas por la gravedad de no solo lo que vemos. Están insertas en un enjambre de partículas que son invisibles, pero que juntas aportan unas cinco veces la masa del átomo ordinario: se trata de la materia oscura.

Y podemos poner a prueba ideas sobre cómo evolucionan las galaxias observándolas cuando eran jóvenes. Se han empleado telescopios gigantes, en el espacio y en la Tierra, para estudiar «campos profundos», cada uno de los cuales abarca un sector diminuto de cielo. Un sector de un diámetro de solo unos pocos minutos de arco, ampliado por estos telescopios, revela cientos de leves manchas: son galaxias, algunas iguales a la nuestra, pero situadas tan lejos que su luz empezó a viajar hace más de 10.000 millones de años. Las estamos viendo recién formadas.

Pero ¿qué ocurrió antes de eso?, ¿antes incluso de que hubiera galaxias? La prueba clave aquí se remonta a 1965, cuando Penzias y Wilson descubrieron que el espacio intergaláctico no es completamente frío. Lo calientan hasta 3 °C unas débiles microondas, de las que ahora sabemos que tienen un espectro que coincide casi exactamente con un cuerpo negro. Se trata del «eco de la creación», el vestigio adiabáticamente enfriado y diluido de una era en que todo era caliente y denso. Es una de las varias líneas de evidencia científica que nos han permitido suscribir el modelo del «*big bang* caliente».



Este objeto celestial parece una delicada mariposa, pero nada más lejos. Lo que serían las alas de la mariposa son chorros de gas calentado a una temperatura que supera los 200.000 °C. El gas atraviesa el espacio a alrededor de un millón de km/h, lo bastante rápido para viajar de la Tierra a la Luna en 24 minutos. Esta imagen fue tomada por la Gran angular 3 (WFC3 en inglés), una nueva cámara instalada por la NASA en el telescopio espacial Hubble, en mayo de 2009





Pero abordemos una cuestión que puede parecer desconcertante. Nuestro complejo cosmos actual presenta un amplísimo abanico de temperaturas y densidades: desde las estrellas ardientes a la oscuridad del cielo nocturno. Hay personas a quienes les preocupa cómo pudo surgir esta intrincada complejidad de una bola de fuego amorfa. La hipótesis parece violar la segunda ley de la termodinámica, que describe una tendencia inexorable de patrones y estructuras a desintegrarse o dispersarse.

La respuesta a esta paradoja parece residir en la fuerza de la gravedad. La gravedad acentúa los contrastes de densidad antes que eliminarlos. Cualquier región surgida con una densidad ligeramente superior a la media podría desacelerarse más porque acusa más la gravedad; su expansión se retrasa más y más, hasta que llega un momento en que deja de expandirse y se separa. Se han hecho numerosas simulaciones de partes de un «universo virtual»: creando un modelo de un ámbito lo bastante grande para generar miles de galaxias. Los cálculos, cuando se exponen como si fueran una película, ilustran con claridad cómo estructuras incipientes aparecen y evolucionan. Dentro de cada cúmulo de escala galáctica, la gravedad acentúa aún más los contrastes, atrae gas que se comprime hasta formar estrellas.

Y hay algo muy importante. Las fluctuaciones iniciales que se introducen en los modelos informáticos no son arbitrarias, sino derivadas de las variaciones que se registran en el cielo de la temperatura de la radiación de fondo de microondas, recogida con hermosa precisión por el satélite artificial Planck del ESA. Este cálculo, que tiene en cuenta las dinámicas de la gravedad y del gas, revela, una vez se ha producido la expansión por 1.000 después de la última dispersión de fotones, un cosmos que encaja bastante desde el punto de vista estadístico con las estructuras visibles actuales y permite calcular la densidad promedio, la edad y la tasa de expansión del universo con un escaso porcentaje de error.

La coincidencia entre el espectro de fluctuación medido por el satélite espacial Planck (en escalas angulares de hasta pocos minutos de arco) y un modelo de seis parámetros —así como la constatación de que estas fluctuaciones evolucionan, por acción de las dinámicas de gravedad y gas, hasta convertirse en galaxias y cúmulos con propiedades que coinciden con nuestro cosmos habitual— supone un inmenso triunfo. Cuando se escriba la historia de la ciencia de estas décadas, este será uno de los grandes hitos, y me refiero a un hito de toda la ciencia: a la misma altura de la tectónica de placas, el genoma y muy pocas más.

### El universo temprano: más hipótesis

¿Y qué hay del futuro lejano? Las criaturas que asistan a la muerte del Sol dentro de 6.000 millones de años no serán humanas; se parecerán a nosotros lo mismo que se parece un hombre a un insecto. La evolución poshumana, aquí en la Tierra y más allá, podría prolongarse tanto como la evolución darwinista que ha conducido hasta nosotros... y ser más asombrosa aún. Y por supuesto la evolución se produce ahora más deprisa, a una escala temporal tecnológica, opera a mayor rapidez que la selección natural y está impulsada por avances en genética y en inteligencia artificial (AI). No sabemos si el futuro a largo plazo residirá en vida orgánica o en vida basada en el silicio.

Pero ¿qué sucederá más adelante todavía? En 1998 los cosmólogos se llevaron una gran sorpresa. Por entonces se sabía bien que la gravedad de la materia oscura dominaba a la de la materia ordinaria, pero también que la materia oscura sumada a la materia ordinaria aportaba solo alrededor del 30% de la llamada densidad crítica. Se creía que esto suponía que vivíamos en un universo cuya expansión se estaba desacelerando, aunque no lo bastante para detenerse por completo. Pero, en lugar de desacelerarse, la relación entre corrimiento al



rojo y distancia para una categoría concreta de estrella en explosión —una supernova de tipo Ia— reveló precisamente que la expansión se estaba acelerando. La atracción gravitacional parecía superada por una fuerza nueva y misteriosa latente en el espacio vacío que aleja a unas galaxias de otras.

La expansión cósmica puede continuar incluso después de la muerte del Sol. Las predicciones a largo plazo rara vez son fiables, pero la hipótesis más segura y «conservadora» es que tenemos por delante casi una eternidad: un cosmos más frío y más vacío todavía. Las galaxias se separan y desaparecen detrás de un «horizonte de sucesos», más o menos al revés de lo que sucede cuando las cosas caen en un agujero negro. Todo lo que quedará serán los restos de nuestra galaxia, Andrómeda y sus vecinas de menor tamaño. Es posible que los protones se degraden, las partículas de materia oscura se destruyan y que haya algún que otro resplandor a medida que se evaporen los agujeros negros. A continuación, silencio.

Es muy posible que dentro de una década se conozca la naturaleza de la materia oscura, pero esta energía —latente en el espacio vacío mismo— plantea un misterio más profundo aún. No será entendida hasta que no tengamos un modelo de la microestructura del espacio. No tengo demasiadas esperanzas de que esto ocurra pronto: todos los teóricos sospechan que implicará fenómenos en la llamada «longitud de Planck», la escala a la que se superponen los efectos cuánticos y la gravedad. La escala es un billón de billones más pequeña que un átomo. La energía negra puede ser el interrogante más importante que presenta ahora mismo el universo.

Pero volvamos al pasado. La radiación de fondo es un mensaje directo de una era en que el universo solo tenía unos pocos cientos de años (desde entonces los fotones han viajado en gran medida sin interrupción, sin dispersarse). Pero tenemos sólidos conocimientos que nos permiten hacer extrapolaciones a épocas aún más remotas, a eras más calientes y densas. Sin duda podemos extrapolar hasta el primer segundo, porque las proporciones calculadas de helio y deuterio producidas (para una densidad nuclear que se ajuste a otros datos) casan a la perfección con lo observado. De hecho, probablemente podemos extrapolar hasta el primer nanosegundo: fue entonces cuando cada partícula tenía 50 gigaelectronvoltios, una energía que puede replicarse en el GCH o Gran Colisionador de Hadrones del CERN de Ginebra, y el universo entero tenía el tamaño de nuestro sistema solar.

Pero preguntas tales como ¿de dónde vinieron las fluctuaciones? O ¿por qué contenía el universo primordial la mezcla que observamos de protones, fotones y materia oscura? nos retrotraen a los aún más breves instantes en que nuestro universo estaba todavía más comprimido, en un contexto de energía ultraelevada en el que los experimentos no ofrecen una guía directa a la física pertinente.

Durante cerca de cuarenta años hemos tenido el llamado «paradigma inflacionario», que propone una era en que el radio de Hubble era mil millones de veces más pequeño que un núcleo atómico. Se trata de una extrapolación al pasado de lo más audaz, a una era en que la física era extrema y no puede ser testada mediante experimentos. Ya existen algunas pruebas que parecen apoyan este paradigma. Sea como sea, puede resultar útil resumir los requisitos esenciales que es necesario explicar si queremos comprender la aparición de nuestro cosmos complejo y estructurado a partir de unos orígenes amorfos:

1. El primer requisito es, por supuesto, la existencia de la fuerza de la gravedad que (tal y como ya se ha explicado), acentúa los contrastes de densidad a medida que el universo se expande, permitiendo que estructuras cohesionadas se condensen a partir de irregularidades de pequeña amplitud inicial. Se trata de una fuerza muy débil. A escala atómica, es



$10^{40}$  veces más débil que la fuerza eléctrica entre el electrón y el protón. Pero en cualquier objeto de gran tamaño, las cargas positiva y negativa se anulan entre sí casi exactamente. En cambio, todo tiene el mismo «signo» de carga gravitatoria, de manera que cuando se unen los átomos suficientes, la gravedad gana. Pero las estrellas y los planetas son tan grandes porque la gravedad es débil. Si fuera más fuerte, aplastaría objetos del tamaño de los asteroides (o incluso de un terrón de azúcar). Así pues, aunque la gravedad es crucial, también es crucial que sea muy débil.

2. Tiene que haber un exceso de materia frente a antimateria.

3. Otro requerimiento para que haya estrellas, planetas y biosferas es que la química no sea trivial. Si el hidrógeno fuera el único elemento, la química sería aburrida. Una tabla periódica de elementos estables requiere un equilibrio entre las dos fuerzas más importantes del micromundo: la fuerza de cohesión nuclear (las «interacciones fuertes») y la fuerza de repulsión eléctrica responsable de separar los protones.

4. Tiene que haber estrellas: átomos ordinarios suficientes frente a materia oscura (de hecho, tiene que haber al menos dos generaciones de estrellas: una para generar los elementos químicos y la segunda para estar rodeada de planetas).

5. El universo debe expandirse al ritmo «adecuado», no implosionar demasiado pronto ni expandirse tan deprisa que impida a la gravedad dar cohesión a las estructuras.

6. Tiene que haber fluctuaciones que permitan actuar a la gravedad: de la suficiente amplitud que favorezcan la aparición de estructuras. De otro modo, el universo sería hidrógeno ultradifuso. No habría estrellas, no habría elementos pesados ni planetas ni personas. En nuestro universo actual, las fluctuaciones iniciales en la curvatura cósmica tienen una amplitud de 0,00001. Según los modelos inflacionarios, dicha amplitud la determinan fluctuaciones cuánticas. Su valor concreto depende de los detalles del modelo.

Otra pregunta fundamental es la siguiente: ¿Cómo de grande es la realidad física? Solo tenemos capacidad de observar un volumen finito. El ámbito que está en contacto causal con nosotros está limitado por un horizonte, una cáscara que nos rodea y que define la distancia a la que la luz (si no se dispersara) habría viajado desde el *big bang*. Pero esa cáscara no tiene mayor significado que el círculo que define nuestro horizonte cuando estamos en medio del mar. Cabría esperar que más allá del horizonte haya más galaxias. En el universo visible no se percibe una inclinación, lo que sugiere condiciones similares en un ámbito que se extiende miles de veces más allá. Pero eso es solo un mínimo. Si el espacio se extendiera lo suficiente, entonces se repetirían todas las posibilidades combinatorias. Mucho más allá del horizonte todos podríamos tener avatares, ¡y quizá nos consuele pensar que algunos han tomado la decisión correcta cuando nosotros nos hemos equivocado!

Pero incluso ese volumen inmenso puede no ser todo lo que existe. «Nuestro» *big bang* puede no ser el único. La física de la era inflacionaria sigue sin estar cimentada. Pero algunas de las opciones podrían conducir a una situación de «inflación eterna», en la que las consecuencias de «nuestro» *big bang* podrían ser una mera isla de espacio-tiempo en un archipiélago cósmico ilimitado.

En un postulado así, el desafío para la física del siglo XXI es dar respuesta a dos preguntas. La primera: ¿hay muchos *big bangs* o solo uno? Y la segunda, todavía más interesante: si





hay muchos ¿están todos gobernados por la misma física? ¿O hay una cantidad enorme de espacios vacíos distintos con microfísicas distintas?

Aunque la respuesta a la primera pregunta sea «sí», habrá leyes generales que gobiernen el universo, tal vez una versión de la teoría de cuerdas. Pero lo que hemos llamado siempre «leyes de la naturaleza» no serán más que ordenanzas municipales en nuestro tramo cósmico. Muchos ámbitos podrían haber nacido muertos o ser estériles: estar gobernados por leyes que no permitan ninguna clase de complejidad. De ser así, no esperaríamos encontrarnos en un universo típico. Más bien estaríamos en un miembro típico del subconjunto en el que podría evolucionar un observador. Entonces sería importante explorar el espacio paramétrico para todos los universos. Esto no será posible hasta que (y la espera puede ser muy larga) una teoría como la de cuerdas futura resulte creíble y que haya sido puesta a prueba proponga una manera de asignar una medida de probabilidad a cada parte del espacio paramétrico.

Hay quienes aseguran que las entidades no observables no forman parte de la ciencia. Pero muy pocos lo creen de verdad. Por ejemplo, sabemos que las galaxias desaparecen detrás del horizonte a medida que se alejan acelerándose. Pero (a no ser que ocupemos una posición central especial y el Universo tenga un «borde» justo a continuación del horizonte actual), habrá galaxias más allá. Y si la aceleración cósmica continúa, siempre estarán más allá. Ni el astrónomo más conservador negaría que estas galaxias nunca observables forman parte de nuestra realidad física. Estas galaxias son parte de las consecuencias de nuestro *big bang*. Pero ¿por qué deberíamos asignarles un estatus epistemológico mayor que a objetos no observables consecuencia de otros *big bangs*?

## «Nuestro» *big bang* puede no ser el único. La física de la era inflacionaria sigue sin estar cimentada. Pero algunas de las opciones podrían conducir a una situación de «inflación eterna», en la que las consecuencias de «nuestro» *big bang* podrían ser una mera isla de espacio-tiempo en un archipiélago cósmico ilimitado

Por proponer una analogía: no podemos observar el interior de los agujeros negros, pero creemos lo que dice Einstein sobre lo que ocurre allí, porque su teoría ha ganado credibilidad al concordar con datos obtenidos de muchos contextos que sí podemos observar. De igual modo, si tuviéramos un modelo que describiera la física de las energías en que se propone que ha ocurrido la inflación y si ese modelo ha sido corroborado de otras maneras, entonces si predice múltiples *big bangs*, deberíamos tomar en serio esa predicción.

Si hay un único *big bang*, entonces aspiraríamos a determinar por qué los números que describen nuestro Universo tienen los valores que medimos (los números de «modelo estándar» de física de partículas además de los que caracterizan la geometría del universo). Pero si hay muchos *big bangs* —la inflación eterna, el paisaje, etcétera—, entonces la realidad física es muchísimo mayor de como la hemos siempre imaginado.

Es posible que dentro de cincuenta años sigamos igual de despistados que hoy respecto al universo ultraprimigenio. Pero es posible que una teoría física cercana a la «energía de Planck» haya para entonces ganado credibilidad. Quizá «prediga» un multiverso y determine en principio algunas de sus propiedades: las medidas de probabilidad de parámetros clave, las correlaciones entre ellas, etcétera.

Hay a quienes no les gusta el multiuniverso; es decir, creen que nunca tendremos explicaciones satisfactorias para los números fundamentales, que, en esta perspectiva más amplia,



pueden ser meros accidentes ambientales. Esto, por supuesto, decepciona a los teóricos más ambiciosos. Pero lo que nosotros prefiramos no afecta a la realidad física, de manera que debemos mantener una mentalidad abierta.

Sin duda, esto tiene una ventaja intelectual y estética. El multiverso supondría una cuarta y grandiosa revolución copernicana. Ya hemos tenido la revolución copernicana, luego hemos sabido que hay miles de millones de sistemas planetarios en nuestra galaxia y, a continuación, hemos constatado que hay miles de millones de galaxias en el universo observable.

Pero entonces nos daríamos cuenta de que no solo nuestro ámbito observable es una fracción minúscula de las consecuencias de nuestro *big bang*, sino que nuestro *big bang* es parte de un conjunto infinito e inimaginablemente diverso.

Esto es física especulativa, pero física, no metafísica. Hay esperanzas de poder darle credibilidad. El estudio más en profundidad de las fluctuaciones en la radiación de fondo dará pistas. Pero, sobre todo, si los físicos desarrollaran una teoría unificada de fuerzas fuertes y electromagnéticas y esa teoría se testara o corroborara en nuestro mundo de baja energía, entonces nos tomaríamos en serio sus predicciones sobre una fase inflacionaria y sobre las verdaderas respuestas a las dos preguntas formuladas más arriba.

He empezado este capítulo describiendo planetas recién descubiertos que orbitan alrededor de otras estrellas. Me gustaría retrotraerme a la ciencia planetaria de hace 400 años, anterior incluso a Newton. En aquel tiempo Kepler creía que el sistema solar era único, y que la órbita terrestre estaba relacionada con los otros planetas mediante hermosas fórmulas matemáticas en las que participaban los sólidos platónicos. Ahora sabemos que hay miles de millones de estrellas, cada una con su sistema planetario. La órbita de la Tierra es especial solo en la medida en que está en el rango de alcance de radios y excentricidades compatibles con la vida (por ejemplo, no está ni demasiado fría ni demasiado caliente, por lo que puede haber agua).

Quizá estemos abocados a un cambio conceptual análogo a una escala mucho mayor. Nuestro *big bang* puede no ser único, como no lo son los sistemas planetarios. Sus parámetros pueden ser «accidentes ambientales», como los detalles de la órbita terrestre. Aspirar a explicaciones precisas en cosmología puede ser una empresa tan inútil como la cruzada numerológica de Kepler.

La existencia de un multiverso llevaría más lejos aún el «destronamiento» de Copérnico: nuestro sistema solar es uno de los miles de millones de sistemas planetarios de nuestra galaxia, que es una de los miles de millones de galaxias accesibles mediante nuestros telescopios, pero todo este panorama puede no ser más que una fracción minúscula de las consecuencias de «nuestro» *big bang*, que en sí mismo puede ser uno de entre miles de millones. A algunos físicos les puede decepcionar que algunos de los números clave que intentan explicar resultan no ser más que contingencias ambientales, no más «fundamentales» que los parámetros de la órbita terrestre alrededor del Sol. Pero para compensar, nos daríamos cuenta que el espacio y el tiempo tienen una gran complejidad, pero a escalas tan vastas que los astrónomos son tan conscientes de ella como sería consciente de la topografía y la biosfera del mundo un plancton cuyo «universo» fuera una cucharada de agua.

Hemos hecho avances impresionantes. Hace cincuenta años los cosmólogos no sabían si había habido un *big bang*. Ahora podemos hacer deducciones bastante precisas remontándonos a un nanosegundo. Así que dentro de cincuenta años, debates que hoy parecen especulaciones poco consistentes tendrán cimientos más sólidos. Pero es importante subrayar que el progreso seguirá dependiendo, como lo ha hecho hasta ahora, en el 95% del perfeccionamiento de los instrumentos y la tecnología y en menos del 5% de la teoría contemplativa o de sillón, pero que esa teoría será aumentada por la inteligencia artificial y por la capacidad de hacer simulaciones.



## Consideración final

Para terminar quiero apartarme del cosmos —incluso de lo que puede ser una amplia diversidad de cosmos gobernados por leyes distintas— y centrarme en el aquí y ahora. A menudo me preguntan si los astrónomos podemos ofrecer una perspectiva especial a la ciencia y a la filosofía. Vemos el planeta en que vivimos en un vasto contexto cósmico. Y en las décadas venideras sabremos si hay vida ahí fuera. Pero lo que es más importante aún, los astrónomos podemos ofrecer la conciencia de un futuro inmenso.

El darwinismo nos enseña que nuestra biosfera actual es el resultado de más de 4.000 millones de años de evolución. Pero la mayoría de las personas, aunque aceptan que nuestros orígenes son producto de la selección natural, siguen creyendo que, de alguna manera, los humanos somos por fuerza la culminación del árbol genealógico evolutivo. Es algo difícil de creer para un astrónomo, de hecho, lo más probable es que estemos más cerca del principio que del final de ese árbol. Nuestro Sol se formó hace 4.500 millones de años, pero aún faltan 6.000 para que se le acabe el combustible. Entonces arderá y engullirá los planetas interiores. Y el universo en expansión continuará —quizá para siempre— destinado a ser un lugar cada vez más frío, más vacío incluso.

Pero mi última reflexión es esta: incluso con esta cronología «tipo acordeón», que se extiende miles de millones de años hacia el futuro y también hacia el pasado, este siglo puede ser decisivo. Durante la mayor parte de la historia, las amenazas a la humanidad han procedido de la naturaleza: enfermedades, terremotos, inundaciones, etcétera. Pero este siglo es especial. Es el primero en el que una especie, la nuestra, tiene en sus manos el futuro de la Tierra y puede poner en peligro el inmenso potencial de vida. Hemos entrado en un periodo geológico llamado «antropoceno».

Nuestra Tierra, ese «punto azul pálido» del cosmos, es un lugar especial. Puede que sea también único. Y nosotros somos sus timoneles en un periodo especialmente crucial. Se trata de un mensaje importante para todos nosotros, nos interese o no la astronomía.



## Notas

1. Sagan, Carl (1994): *Pale Blue Dot: A Vision of a Human Future in Space*, Nueva York: Random House. [Ed. esp. (2006): *Un punto azul pálido: una visión del futuro humano en el espacio*, Barcelona, Planeta.]
2. Ver, por ejemplo, Misner, Charles W.; Thorne Kip S. y Wheeler, John Archibald (2017): *Gravitation*, (1ª ed. 1973), Nueva Jersey, Princeton University Press.
3. Chandrasekhar, Subrahmanyan (1998): *The Mathematical Theory of Black Holes*, (1ª ed. 1983), Oxford, Oxford University Press.
4. *The New York Times*, 10 de noviembre de 1919.



## ESCUCHA EL AUDIO DE ESTE CAPÍTULO



### ACCEDE AL LIBRO COMPLETO

- ¿Hacia una nueva Ilustración? Una década trascendente
- Towards A New Enlightenment? A Transcendent Decade

### ACCESO AL ARTÍCULO EN INGLÉS

The Past Decade and the Future of Cosmology and Astrophysics

#### CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Rees, M., "La última década y el futuro de la cosmología y la astrofísica", en ¿Hacia una nueva Ilustración? Una década trascendente, Madrid, BBVA, 2018.

### ARTÍCULOS RELACIONADOS

#### LEER MÁS SOBRE #CIENCIA #FÍSICA

- Viajes interestelares y poshumanos  
*El próximo paso: la vida exponencial, Martin Rees*
- Estructura y evolución del universo  
*Fronteras del conocimiento, Francisco Sánchez Martínez*
- Cronología del universo [Vídeo-infografía]

## TODOS LOS TÍTULOS DE LA COLECCIÓN OPENMIND

