

# IAA

63

FEBRERO DE 2021  
revista.iaa.es

Información y actualidad astronómica

Revista de divulgación del Instituto de Astrofísica de Andalucía

## La larga historia del (no) metano en Marte

Imagen de la cordillera Nereidum en el hemisferio sur de Marte tomada por la cámara estéreo de alta resolución (HRSC) a bordo de la misión Mars Express de la ESA en 2015.



CSIC

**Directora:** Silbia López de Lacalle. **Comité de redacción:** Antxon Alberdi, Carlos Barceló, Sara Cazzoli, René Duffard, Emilio J. García, Pedro J. Gutiérrez, Susana Martín-Ruiz, Enrique Pérez-Montero, Pablo Santos y Montserrat Villar. **Edición, diseño y maquetación:** Silbia López de Lacalle. **Contacto:** revista@iaa.es

Este número ha contado con el apoyo económico de la Agencia Estatal de Investigación (Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades) a través de la acreditación de Centro de Excelencia Severo Ochoa para el Instituto de Astrofísica de Andalucía (SEV-2017-0709).

La página web de esta revista ha sido financiada por la Sociedad Española de Astronomía (SEA).

Copyright: © 2018 CSIC. Esta es una revista de acceso abierto distribuida bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Instituto de Astrofísica de Andalucía, Consejo Superior de Investigaciones Científicas  
Excelencia Severo Ochoa 07/2018 - 07/2022

NIPO: 833-20-069-5  
e-NIPO: 833-20-070-8  
Depósito legal: GR-605/2000  
ISSN: 1576-5598

# SUMARIO

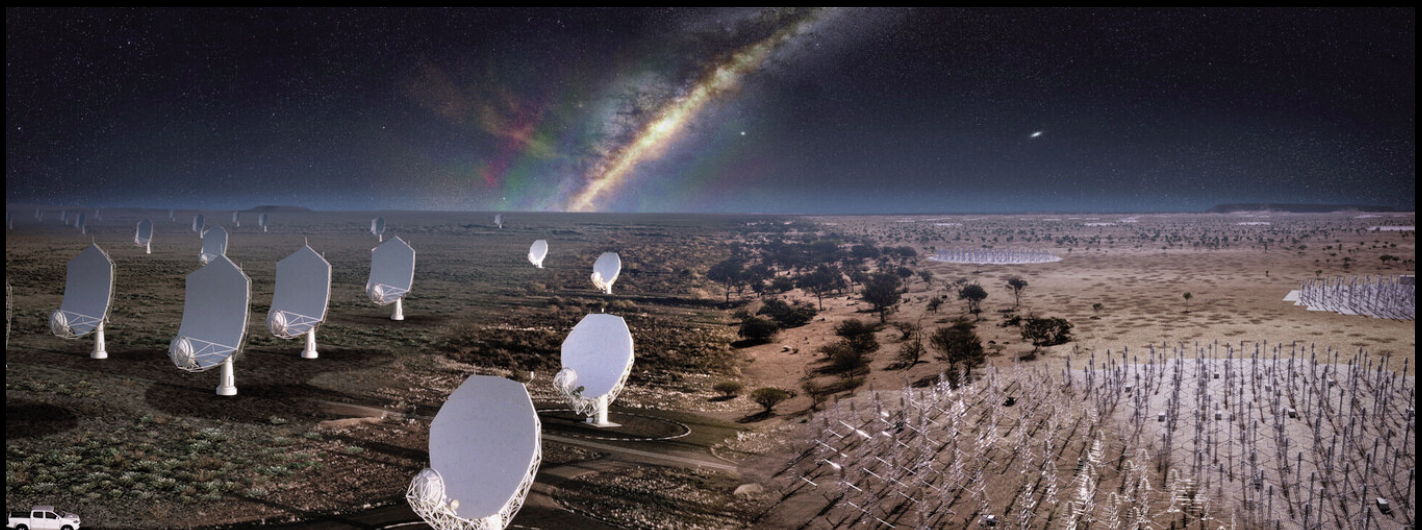
La larga historia del (no) metano en Marte ...	3
La forma del universo ...	8
Deconstrucción. Nuevos proyectos para Calar Alto ...	12
Historias ... Nancy Boggess. Una astrónoma en la NASA ...	15
El Moby Dick de ... Concepción Cárdenas (MPIA) ...	16
Actualidad ...	17
Sala limpia ...	21
Pilares e incertidumbres ...	22

## NACE SKAO, EL MAYOR OBSERVATORIO DE RADIOASTRONOMÍA DEL MUNDO

España participaba en febrero en el Consejo de constitución del segundo mayor organismo internacional dedicado a la astronomía después del Observatorio Europeo Austral (ESO). El observatorio de radioastronomía SKAO, siglas en inglés de *Square Kilometre Array Observatory*, estará dedicado a la construcción y operación, en Sudáfrica y Australia, de los dos radiotelescopios más grandes y complejos concebidos hasta la fecha para estudiar cuestiones clave sobre el universo.

Durante las dos últimas décadas, España ha tenido un papel activo en la fase de diseño del Observatorio con una participación importante de la comunidad científica nacional en la definición de la ciencia de SKA. Además, nuestra industria ha tenido un papel relevante al participar en la mayoría de los consorcios de diseño de la infraestructura. El compromiso de España para la construcción del Observatorio es de 41,4 millones de euros durante los próximos diez años. Se prevé que la construcción de los telescopios se extienda ocho años, con los primeros resultados científicos disponibles a mediados de esta década. Además de los avances que SKAO aportará a la astronomía, su creación supondrá un importante impulso en muchas otras áreas, como las de las tecnologías digitales y de comunicación, la supercomputación o el big data.

La participación española en SKA está liderada por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC).



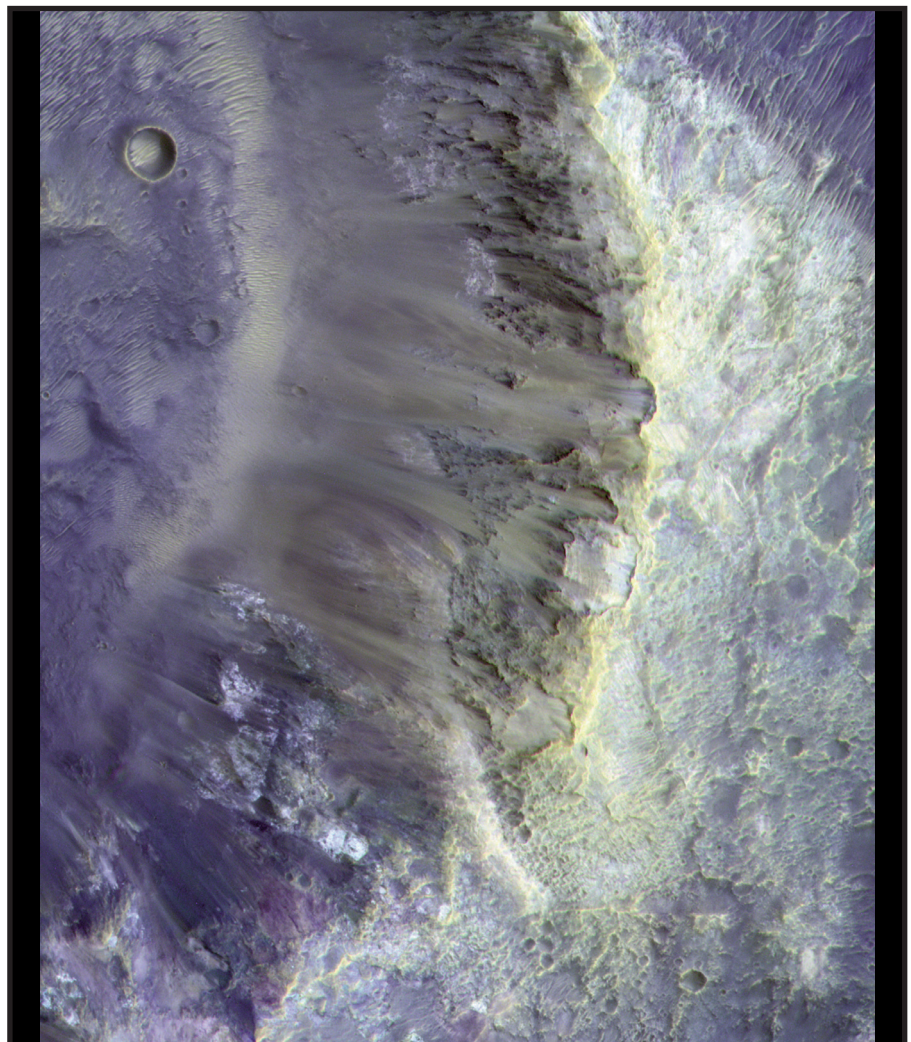
## La larga historia del (no) metano en Marte

**LOS DATOS MÁS RECIENTES Y PRECISOS SOBRE EL METANO EN MARTE DESMIENTEN LA EXISTENCIA DE ESTE GAS EN LA ATMÓSFERA MARCIANA, QUE TANTOS TITULARES HA ALENTADO**

José Juan López Moreno  
(IAA-CSIC)

La búsqueda de vida o de indicios de esta en el universo ha sido y es una de las tareas que han movido a la humanidad a desarrollar tanto la ciencia como la tecnología asociada, y esperamos que siga siendo un motor que haga avanzar a la humanidad. Es obvio que, descartada la Luna como posible hábitat de seres vivos por muchos motivos –uno evidente: la ausencia de una atmósfera que permita el desarrollo de compuestos complejos–, y descartada también la superficie de Venus por sus condiciones de presión y temperatura, nos queda Marte, con unas condiciones cercanas a las de habitabilidad, con una atmósfera que, aunque débil, permitiría la presencia de compuestos complejos, y con una superficie que muestra rasgos de haber tenido, en el pasado, una atmósfera más densa y con posibilidad de presencia de agua líquida en su superficie.

Por tanto, la búsqueda de indicios de vida en Marte y la presencia de metano en su atmósfera podría ser uno de esos importantes indicios que ha movido a la ciencia a esforzarse en buscarlo. Por ello se han realizado muchos intentos para detectar, cuan-



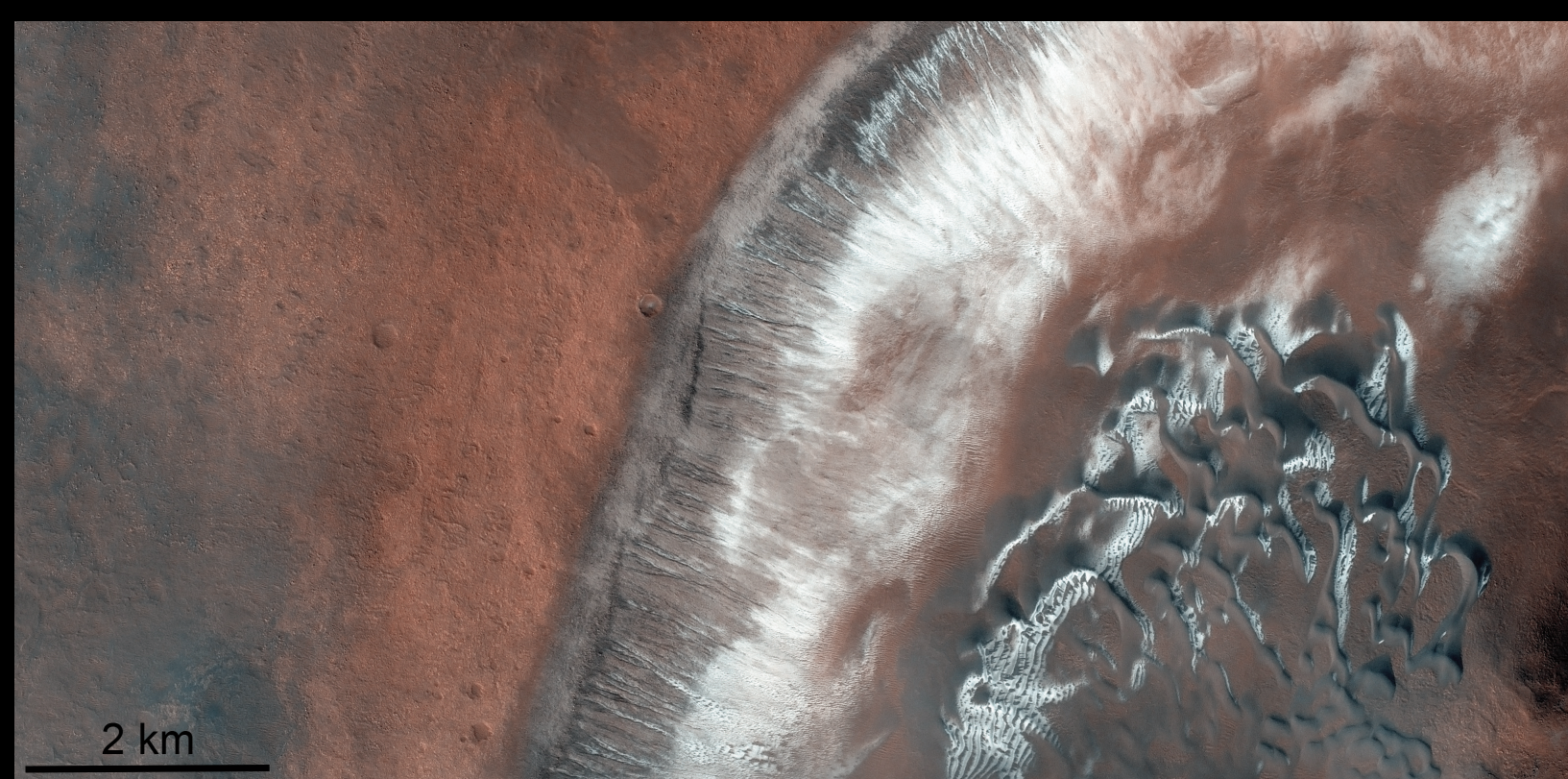
Esta imagen muestra la pared sureste de un pequeño cráter ubicado a unos cientos de kilómetros al norte de la gigantesca cuenca de impacto Hellas en Marte. El cráter completo mide unos 12 kilómetros de diámetro, y esta imagen muestra un área de 5 x 10 kilómetros. Fuente: ESA/Roscosmos/CaSSIS.

tificar y buscar el origen y el destino del posible metano en Marte. El objetivo de este trabajo es explicar cómo se ha tratado de entender este tema por la comunidad científica.

### ¿QUÉ ES EL METANO?

El metano ( $\text{CH}_4$ ), el hidrocarburo más simple, contiene un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno; su masa molecular,

por tanto, es de 16 dalton, mucho menor que la masa molecular media de la atmósfera de Marte (compuesta principalmente por  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y Ar), que es de 43.1 dalton. Por tanto, cualquier emanación de metano que se produjera en la superficie se iría elevando y mezclándose de forma uniforme (disolviéndose) en la troposfera marciana. Los modelos de composición y dinámica de la atmósfera de Marte muestran que



La imagen, tomada el 27 de abril de 2020, muestra parte de un cráter de impacto en el hemisferio sur de Marte. La imagen revela un campo de dunas casi negro a la derecha, rodeado de suelos rojos parcialmente cubiertos de hielo blanco brillante. Fuente: ESA/ExoMars/CaSSIS.

cualquier producción de metano en su superficie estaría disuelta de forma prácticamente regular hasta una altura de diez kilómetros en 24 horas (2). Los modelos también muestran que cualquier liberación de metano se distribuirá de forma uniforme en toda la atmósfera de Marte en un plazo inferior a un mes.

Paralelamente, el tiempo medio de vida del metano en la atmósfera de Marte (es decir, el tiempo para que  $n$  moléculas en la atmósfera se reduzcan hasta  $n/e$ , siendo  $e = 2.72...$ ) es superior a 300 años, según todos los modelos atmosféricos desarrollados para entender su atmósfera.

De lo anterior se deduce que:

1. Cualquier metano que se libere por cualquier medio en la atmósfera de Marte permanecerá en ella durante muchos años, incluso en el caso de que no se siguiera liberando.

2. Cualquier metano que se libere en la atmósfera de Marte se distribuirá en forma de mezcla uniforme (fracción respecto a la suma de otros componentes constante) en el plazo máximo de un mes.

Sobre el origen del metano en Marte se han barajado distintas hipótesis, si bien hasta ahora ninguna está demostrada ni mucho menos cuantificada. Una posible explicación de base biológica indica que el metano estaría producido por posibles bacterias en un ambiente subterráneo.

Entre las hipótesis de carácter no biológico

cabe situar los siguientes procesos: serpen-tinización de la olivina, degradación por radiación ultravioleta de posibles materiales orgánicos depositados por meteoritos, impactos de cometas, descomposición de clatratos subsuperficiales, producción geotérmica y algunos más ....

Por otra parte, el metano en la Tierra tiene un origen mayoritariamente biológico y es producido por organismos vivos y por la degradación de compuestos orgánicos más complejos en sus procesos digestivos. Una fracción minoritaria es emitida a la atmósfera desde los depósitos de hidrocarburos que se encuentran en el subsuelo.

### PRIMERAS NOTICIAS SOBRE EL METANO EN MARTE

La primera referencia histórica y pretendidamente científica se publicó como *Announcement* en la revista *Science* en agosto de 1966 (1). En dicho anuncio, los autores declararon haber detectado unos gases en la atmósfera de Marte a los que, sin identificar, llamaron *substitutes methane*. Aunque prometieron publicar la identificación espectroscópica del “descubrimiento”, nunca llegaron a publicar los resultados para confirmarlo y tampoco se retractaron jamás, aunque, eso sí, ninguno de los tres firmantes del anuncio volvió a hablar ni a publicar una sola palabra sobre el metano en Marte.

El siguiente hito en esta historia ocurre tres

años después, con el sobrevuelo de la nave *Mariner 7* en Marte el 5 de agosto de 1969. Dos días después, NASA organiza una rueda de prensa en la que anuncia que *Mariner 7*, mediante espectroscopía infrarroja, había detectado metano y amoníaco en el polo sur de Marte. La noticia rápidamente saltó y se extendió por todo el mundo, siendo recogida por la prensa americana. El *New York Times* fue una de las cabeceras que se hizo eco del supuesto hallazgo, con el siguiente titular: “Dos gases asociados con la vida, encontrados en el polo sur de Marte”.

Sin embargo, poco más de un mes después, el mismo equipo que había hecho tan trascendental anuncio volvió a convocar otra rueda de prensa en la que se desdijeron de lo anterior y señalaron que todo ello había sido una mala interpretación de los datos y que las absorciones en la espectroscopía infrarroja no se debían a ningún gas atmosférico, sino a bandas de absorción del hielo de dióxido de carbono presente en el polo sur. La decepción fue tan grande como la vergüenza de haber hecho pública una conclusión tan importante sin haber hecho un análisis suficientemente serio de los datos.

Ese necesario análisis serio y con consistencia científica se realizó durante los años en los que *Mariner 9* siguió enviando espectros desde Marte, de tal forma que, en 1977, tras analizarse 1747 espectros

tomados por *Mariner 9*, se concluyó que no se había detectado metano en Marte por encima de 20 partes por mil millones en volumen (20 ppbv). Esto significa que el límite superior de la concentración de metano, si es que hay alguno, sería de 20 ppbv. Entiéndase que esto no supone que haya 20 ppbv de metano, sino que habría un 95% de probabilidad de que la abundancia de metano, de haberla, sería inferior a 20 ppbv, y que habría un 99,7% de probabilidad de que esta sea inferior a 30 ppbv.

Aunque el *New York Times* nunca publicó la rectificación, sí lo hicieron *Los Angeles Times* y el *Wall Street Journal*, aunque ya no en primera página.

### RENACIMIENTO DE LA BÚSQUEDA DE METANO EN MARTE

Sin embargo, la posibilidad de detectar cualquier signo de vida en Marte, y el metano atmosférico es uno de ellos, no perdió interés como objetivo científico. Aunque tuvo que esperar al año 2004, cuando tres equipos diferentes, dos de ellos desde observatorios en tierra y uno con un espectrógrafo en órbita marciana anunciaron, de nuevo, el descubrimiento de metano en la atmósfera de Marte.

Así, en 2004 se publicaron pretendidas detecciones de metano en la atmósfera de Marte: una primera publicación en *Icarus* (3), que abrió la puerta a otra en *Science* (4), además de una presentación en un congreso (5). La primera y la tercera presentaban datos tomados desde telescopios en tierra. La segunda lo hacía con datos tomados por el instrumento PFS a bordo de *Mars Express* desde una órbita marciana.

Las diferentes medidas eran relativamente parecidas (entre 10 y 60 ppbv), lo que las dotaba de credibilidad y podía hacer pensar en un consenso científico, aunque no siempre un consenso científico supone una constatación científica. Recordemos, en este sentido, cómo en el siglo XVII algunos físicos como Isaac Newton, astrónomos como Kepler, además de varios clérigos llegaron, de forma independiente, a la conclusión de que la edad de la Tierra era de alrededor de seis mil años. Sin embargo, todos ellos se equivocaban solo en unos cuatro mil millones de años (6).

Y ahora, volviendo a las publicaciones del 2004 sobre el metano en Marte, no solo los valores obtenidos eran del mismo orden, sino que también presentaban unas características similares en cuanto a la variación temporal o geográfica de la concentración de metano en la atmósfera. Y, precisa-



El rover *Curiosity* (NASA).

mente, esas similitudes provocaron en la comunidad científica una evidente sospecha de la poca fiabilidad de los datos obtenidos: como se explicó al principio, de haber metano en la atmósfera de Marte este debería ser uniforme en todo el planeta y con una distribución también uniforme con la altura. Los resultados presentados por los tres equipos contradecían estas premisas.

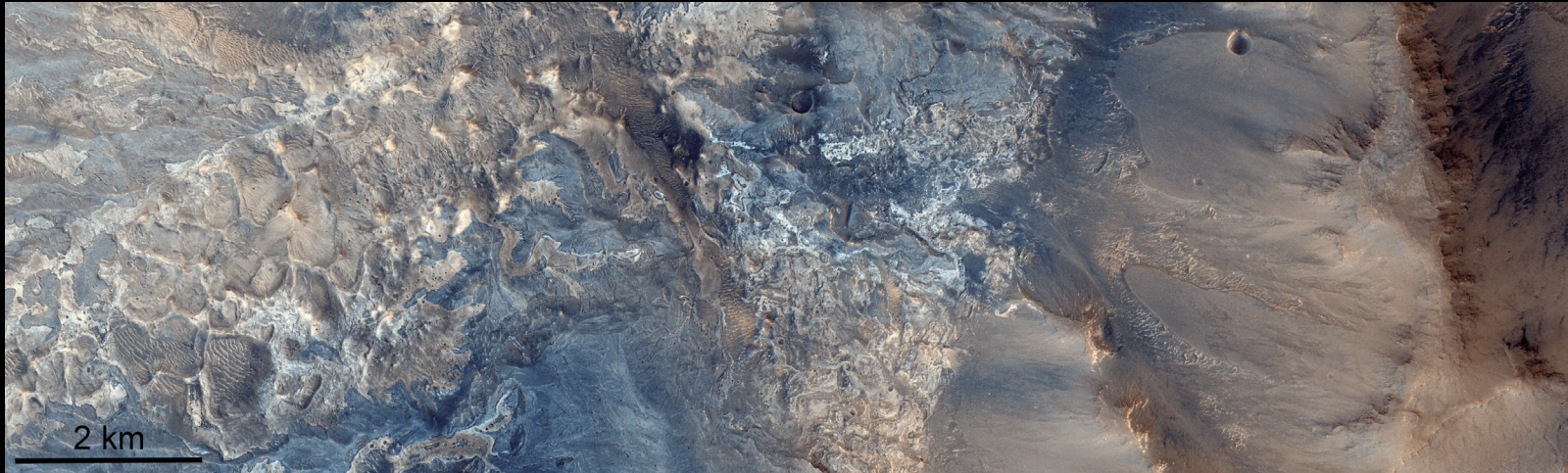
El problema estaba planteado: o bien lo que se estaba midiendo no era metano, o lo que se conoce de modelos fotoquímicos y de física atmosférica estaba totalmente equivocado, o existían procesos desconocidos que permitían no solo la producción de metano sino, especialmente, su desaparición, de forma que los mecanismos que eliminaban el metano en Marte serían mil veces más rápidos de lo que los conocimientos hasta el momento calculaban.

Las publicaciones de observaciones de metano, tanto desde órbita (PFS) como desde telescopios terrestres continuaron produciéndose y, en el año 2010, en plena efervescencia de las detecciones de metano en Marte, el equipo dirigido por S. Fonti revisó las observaciones tomadas por el instrumento TES a bordo del *Mars Global Surveyor* (MGS). En concreto, se analizaron un total de casi tres millones de espectros de una muy baja resolución, en con-

creto diez veces menor que la de PFS que, a su vez, es doscientas veces menor de la necesaria para resolver las líneas de la banda del metano. Pues bien, con esos datos, Fonti y Marzo publicaron un artículo (7) en el que presentaban una distribución del metano a lo largo y ancho de la superficie del planeta con valores entre 0 y de 80 ppbv, distribuidos de manera irregular.

Los resultados publicados, al igual que los obtenidos tanto por PFS como desde telescopios terrestres, claramente atentaban contra los más elementales principios de física atmosférica, que indican que el metano en esas cantidades debería estar distribuido de forma prácticamente uniforme por el planeta. Afortunadamente, y con una dosis de honradez científica que los acredita como grandes científicos, cinco años después, revisando críticamente los resultados publicados con anterioridad, el mismo equipo envió un nuevo trabajo (8) en el que se reconocía el error de publicar el primer trabajo y confirmaban: “Nuestros hallazgos [...] confirman [...] que ningún espectro sintético puede reproducir un espectro marciano promedio con la precisión necesaria para evaluar la presencia de metano”.

La relevancia de esta segunda publicación debería haber vuelto a situar el tema del



Esta imagen, tomada el 5 de mayo de 2020, muestra una parte del suelo del cañón de Ius Chasma, parte del sistema de cañones de Valle Marineris que se extiende casi una cuarta parte de la circunferencia de Marte al sur del ecuador del planeta. Fuente: ESA/ExoMars/CaSSIS.

metano en Marte en el lugar de donde no debería haber salido: científicamente no puede afirmarse su existencia en la atmósfera marciana con unos valores y unas variaciones temporales y geográficas como las presentadas.

### EL CURIOSO CASO DE CURIOSITY

La misión de NASA *Mars Science Laboratory*, lanzada el 26 de noviembre de 2011 y que aterrizó en Marte el 6 de agosto de 2012, llevaba como elemento principal un vehículo rover llamado *Curiosity*, equipado con instrumental capaz de estudiar con gran detalle la composición de la atmósfera y de la superficie. Con ese objetivo se diseñó el *Sample Analysis at Mars* (SAM). Está formado por un conjunto de sensores que incluyen un cromatógrafo de gases, un espectrómetro de gases y un espectrómetro láser sintonizable. Este último está diseñado para detectar metano por encima de 0.3 ppbv aunque, mediante un sistema de enriquecimiento, anunciaban que podrían llegar a algunas N partes “per trillion”, entre 50 y 100 veces más sensible, es decir, 0.00N ppbv. Textualmente: “el espectrómetro de SAM Suite está diseñado para detectar metano por encima de 0.3 ppbv [...] TLS en SAM tendrá la capacidad de detectar abundancias de metano atmosférico de partes por billón (!) en la atmósfera marciana” (11).

Las primeras medidas de metano con TLS se realizaron el 25 de octubre de 2012 con un resultado ( $1.62 \pm 2.03$  ppbv) que claramente indicaba que, de haber metano, su concentración estaba claramente por debajo del límite de detección del instrumento. En los siguientes meses, *Curiosity* realizó otras cinco medidas más con resultados que confirmaban el primero, lo que llevó al equipo científico a publicar: “Hasta la fecha, informamos de la no detección de metano atmosférico con un

valor medido de  $0.18 \pm 0.67$  ppbv correspondiente a un límite superior de solo 1.3 ppbv (nivel de confianza del 95%)” (12). Solo dos años más tarde, el mismo equipo (11), tras realizar siete medidas más y “revisar ligeramente” las medidas anteriormente publicadas, llegaron a conclusiones absolutamente contrarias. De las seis primeras medidas, cuatro de ellas confirmaron la no detección, incluso aumentando el grado de fiabilidad de los resultados, pero las dos medidas del mes de junio de 2013 son revisadas y pasan de ser:

16 de junio 2013:  $-2.21 \pm 0.94$

23 de junio 2013:  $-0.50 \pm 0.94$

a

16 de junio 2013:  $5.78 \pm 2.27$

23 de junio 2013:  $2.13 \pm 2.02$

Es decir, las dos detecciones claramente negativas se convirtieron en positivas y, además, una detección positiva de 5.78 ppbv empezaba a acercarse a los valores pretendidamente medidos por las publicaciones anteriores. Con ello se volvía a abrir la cuestión. Contrariamente a los resultados publicados sobre las primeras medidas, las nuevas sí daban valores superiores a los límites de detección, es decir: de las siete medidas solo una estaba por debajo del límite de detección, las demás se presentaban como detecciones positivas y algunas de ellas con valores puntuales superiores a 5 ppbv, incluso una de ellas de 9 ppbv.

### EXOMARS TGO: NOMAD Y ACS

En este contexto se incluyen, dentro del programa *Exomars* de exploración de la ESA, dos instrumentos (NOMAD y ACS) especialmente diseñados para estudiar, con una precisión cien veces mayor que la utilizada hasta el momento, la concentración de los gases que forman la atmósfera marciana

y su distribución con la altura. Así, uno de los objetivos del instrumento NOMAD, a bordo de *Exomars*, reza textualmente: “perfiles verticales y mapeo de metano”.

Es decir que, a pesar de las enormes dudas existentes sobre la veracidad de las medidas publicadas que se reflejaban en la imposible explicación de su comportamiento tanto espacial como temporal, se incluyeron en la misión los objetivos de estudiar con detalle la distribución del metano y la identificación de las posibles fuentes y mecanismos de destrucción con el objetivo de llegar a entender el comportamiento del metano en la atmósfera marciana.

*Exomars-TGO* se lanzó en marzo del 2016, se situó en órbita alrededor de Marte en octubre de ese mismo año y los instrumentos a bordo (específicamente NOMAD y ACS) están tomando espectros de la atmósfera de Marte desde abril de 2018 mediante la técnica de ocultación solar. Hasta abril de 2019 se realizaron 2.606 ocultaciones y se obtuvieron más de 210.000 espectros en las que estarían presentes las líneas del metano.

Los resultados (9 y 10), tomados a lo largo de un año completo cubriendo prácticamente la totalidad del planeta y sondeando desde 100 hasta 6 kilómetros de altura muestran la no detección de metano a niveles superiores de 0,061 ppbv. Dichas medidas están en completo desacuerdo con las pretendidas medidas anteriores y en total acuerdo con los resultados de otro instrumento a bordo de *Exomars-TGO*, ACS, que tampoco encontró metano por encima de un límite de 0,05 ppbv, en medidas realizadas desde 100 hasta 2 kilómetros de altura.

### RENACIMIENTO DE PFS

Una semana antes (abril 2019) de la publicación en *Nature* de los resultados de los instrumentos NOMAD y ACS (7), que

mostraban que, tras un año de observaciones y con miles de espectros tomados cubriendo prácticamente todo el planeta hasta una altura de cinco kilómetros, el metano, de haberlo, estaría por debajo de 0.05ppbv, *Nature Geoscience* (13) publicó otro artículo en el que el equipo de PFS, tras revisar los datos de órbitas de seis años antes, presentaron una medida de 15.5 ppbv, precisamente referida al día siguiente de la medida publicada por *Curiosity* de 5.78 ppbv. Las medidas, presentadas por el equipo de PFS, se obtuvieron aplicando una nueva forma de observación e integrando y promediando 275 espectros en la zona del cráter Gale.

Las nuevas medidas implican que, de ser ciertas, habría una gran cantidad de metano distribuida por una región extensa del planeta, lo cual atenta contra todos los modelos del comportamiento de las atmósferas planetarias, que predicen que, de haber una cantidad importante de metano, este se distribuye en pocos meses en toda la atmósfera y debería haber sido detectado por el mismo PFS en las órbitas anteriores y siguientes.

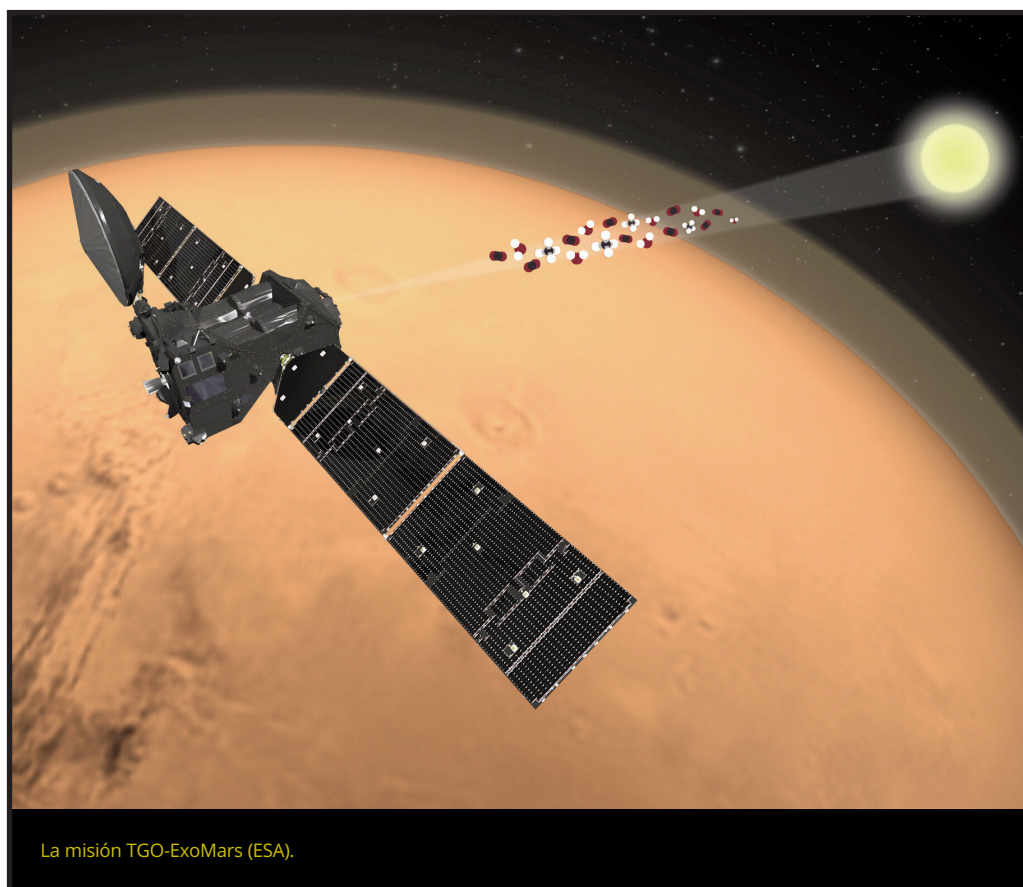
En suma, la publicación de los resultados de PFS, en vez de dar credibilidad y confirmar la medida puntual y localizada de *Curiosity*, restringida a la proximidad de la superficie (lo que la haría compatible con las no detecciones realizadas por NOMAD y ACS), en realidad vuelve a quitar credibilidad a las detecciones de metano ya que, de ser cierta la medida de PFS, la enorme cantidad de metano que se necesita para justificar sus medidas debería mantenerse en la atmósfera durante muchos años y deberían haber sido detectadas por ACS y NOMAD y, también, por *Curiosity* y PFS, lo que no se ha producido.

## CONCLUSIÓN

Todas las medidas presentadas hasta el momento son compatibles (debido a sus márgenes de error) con la ausencia de metano en la atmósfera de Marte, como han confirmado NOMAD y ACS. Los intervalos de confianza de las medidas previas a NOMAD y ACS son suficientemente amplios como para ser compatibles con la no detección.

La precisión de las medidas de ACS y NOMAD es mucho más elevada que la de cualquier otra medida previa y, tras más de 200.000 espectros analizados, el nivel de metano en la atmósfera de Marte es inferior a 0.06 ppbv.

Aunque las observaciones de ACS y NOMAD se realizan a alturas superiores a



tres kilómetros, en caso de que por debajo de esa altura en algún momento hubiese metano debería haber sido detectado por ellos unas horas o días después.

## REFERENCIAS

- (1) *Mars: New Absorption Bands in the Spectrum*. Author(s): Connes, J., Connes, P. and Kaplan, L. D. Source: *Science, New Series*, Vol. 153, No. 3737 (Aug. 12, 1966), pp. 739-740.
- (2) Holmes, J. A., Patel, M. R. and Lewis, S. R. (2017). *The vertical transport of methane from different potential emission types on Mars*. *Geophysical Research Letters*, 44(16) pp. 8611-8620.
- (3) Krasnopolsky, V.A., Maillard, J.P., and Owen, ± C. (2004) *Detection of methane in the martian atmosphere: evidence for life?* *Icarus* 172 537-547.
- (4) Formisano, V., Atreya, S., Encrenaz, ±., Ignatiev, N., & Giuranna, M. (2004) *Detection of Methane in the Atmosphere of Mars*. *Science*, 306, 1758.
- (5) Mumma, M.J., Novak, R. E. Di Santi, M. A, Bonev, B., Dello Russo, N., Hewagama, T. and Smith, M. (2004) *Detection and Mapping of Methane and Water on Mars: Evidence for local enhancements in Methane*. *Abstract submitted to American Astronomical Society's Division for Planetary Sciences (DPS) annual meeting,*

Louisville, KY, 8-12 November.

- (6) Weintraub, D. A. (2018). *Life on Mars, what to know before we go*. Princeton University Press. p. 223.
- (7) S. Fonti and G. A. Marzo (2010) *Mapping the methane on Mars*. *Astronomy & Astrophysics*, 512, A51.
- (8) S. Fonti et al. (2015) *Revisiting the identification of methane on Mars using TES data* *Astronomy & Astrophysics* 581, A136.
- (9) O. Korablev et al., (2019) *No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations*. *Nature*, 568, 517.
- (10) Knutsen E.W. et al. (2021) *Comprehensive investigation of Mars methane and organics with ExoMars/ NOMAD*. *Icarus*, 357, 114266.
- (11) C.R. Webster and P.R. Mahaffy (2011) *Determining the local abundance of Martian methane and its' 13C/12C and D/H isotopic ratios for comparison with related gas and soil analysis on the 2011 Mars Science Laboratory (MSL) mission*. *Planetary and Space Science* 59 271-283
- (12) C.R. Webster et al. (2013) *Low Upper Limit to Methane Abundance on Mars*. *Science*, 342, 355.
- (13) C.R. Webster et al. (2015) *Mars methane detection and variability at Gale crater*. *Science*, 347, 6220, 415
- (14) M. Giuranna et al. (2019) *Independent confirmation of a methane spike on Mars and a source region east of Gale Crater*. *Nature Geoscience*, 12, 326-332.

## La forma del universo: una abstracción que desafía los sentidos

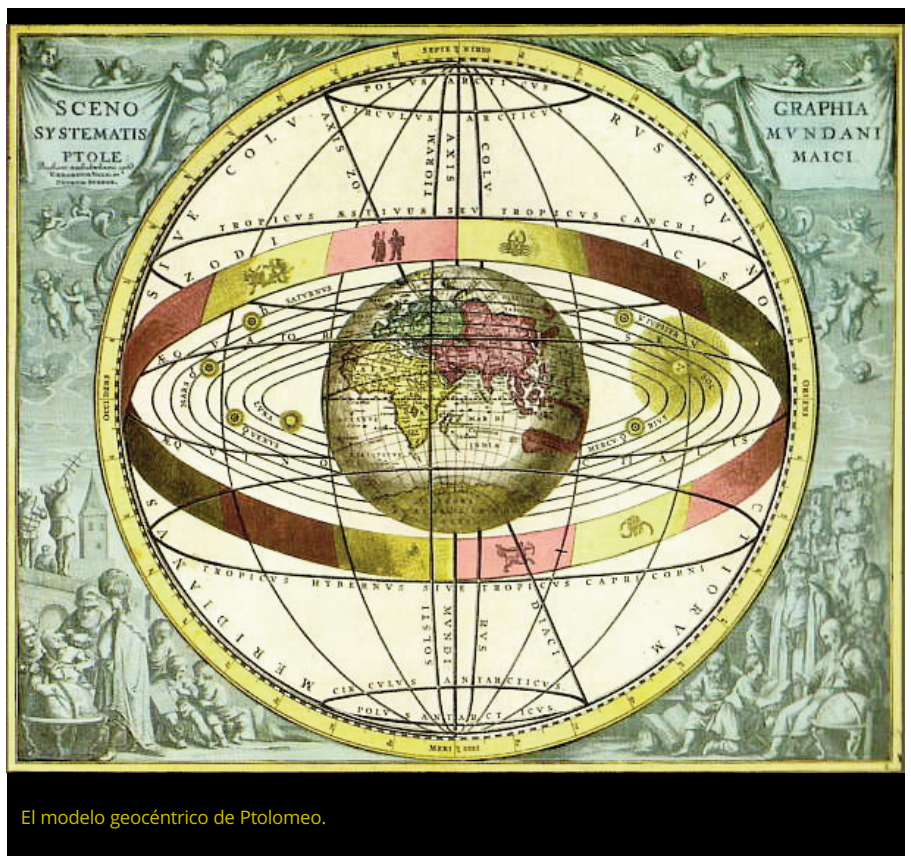
### ABORDAMOS UNO DE LOS ASPECTOS MENOS INTUITIVOS DE LA ASTROFÍSICA

Enrique Pérez Montero  
(IAA-CSIC)

El año 2020 está suponiendo un reto para toda la población mundial. Si bien es verdad que no en la misma medida para todos, pues hemos de distinguir entre aquellos que luchan en primera línea contra la ya célebre para siempre COVID-19, bien por sufrirla en primera persona o bien por combatirla como parte de sus trabajos, y todos los demás. Personalmente, y solo de momento pues no sabemos lo que nos puede deparar el futuro, yo no he visto alterada mi vida en mayor medida que la de seguir las normas sanitarias y de confinamiento, lo que me ha permitido pasar más tiempo con mi familia, con la que convivo sin dejar de atender mi trabajo. Eso ha supuesto estar más pendiente, por ejemplo, de las tareas escolares de mis dos hijas. La pequeña ha iniciado en septiembre sus estudios de educación secundaria y ha comenzado las asignaturas de biología y geología, y también la de geografía e historia, con el mismo tema: el universo. No es mi intención con el presente artículo hacer un repaso de todas aquellas cosas que se podrían enmendar en los libros de texto de estas dos asignaturas, pero sí que me llamó la atención la siguiente aseveración: “No sabemos la forma del universo, ni tampoco si es infinito, [...] pero podemos afirmar que tiene un diámetro de 93.000 millones de años luz”, lo que no deja de llamar la atención ya que se unen dos afirmaciones aparentemente contradictorias en la misma sentencia. No parece que ni los

alumnos ni los profesores sean capaces de sacar en claro una concepción mental de cuál es realmente la forma de nuestro universo a partir de explicaciones tan vagas como esta. Se da asimismo la circunstancia adicional de que en muchas de mis actividades de divulgación me hacen preguntas recurrentes sobre distintos aspectos relacionados con el universo como un todo, tratando de encontrar referencias intuitivas que ayuden a hacerse una idea mejor sobre su forma, su extensión, su edad, su geometría, su futuro y, claro, es que estamos ya un poco saturados de ver siempre las mismas ilustraciones y metáforas sobre el Big Bang y la subsiguiente expansión sin tener muy claro de qué estamos hablando.

Desde un punto de vista puramente observacional podemos visualizar el universo como una esfera cuyo centro está ocupado por el planeta Tierra. No, no es que quiera reivindicar de nuevo el modelo geocéntrico de Ptolomeo, es simplemente que todo puede redefinirse cambiando el sistema de referencia y el origen de coordenadas, se encuentre este o no en movimiento, y, de manera natural para nosotros y solo para nosotros, el planeta Tierra está en el centro del universo observacional. Esta cuestión la explica muy bien Jorge Wagensberg en sus libros y ensayos, cuando él defiende que cuando un 25% de la población española cree que el Sol gira alrededor de la Tierra, estos, en realidad, no afirman





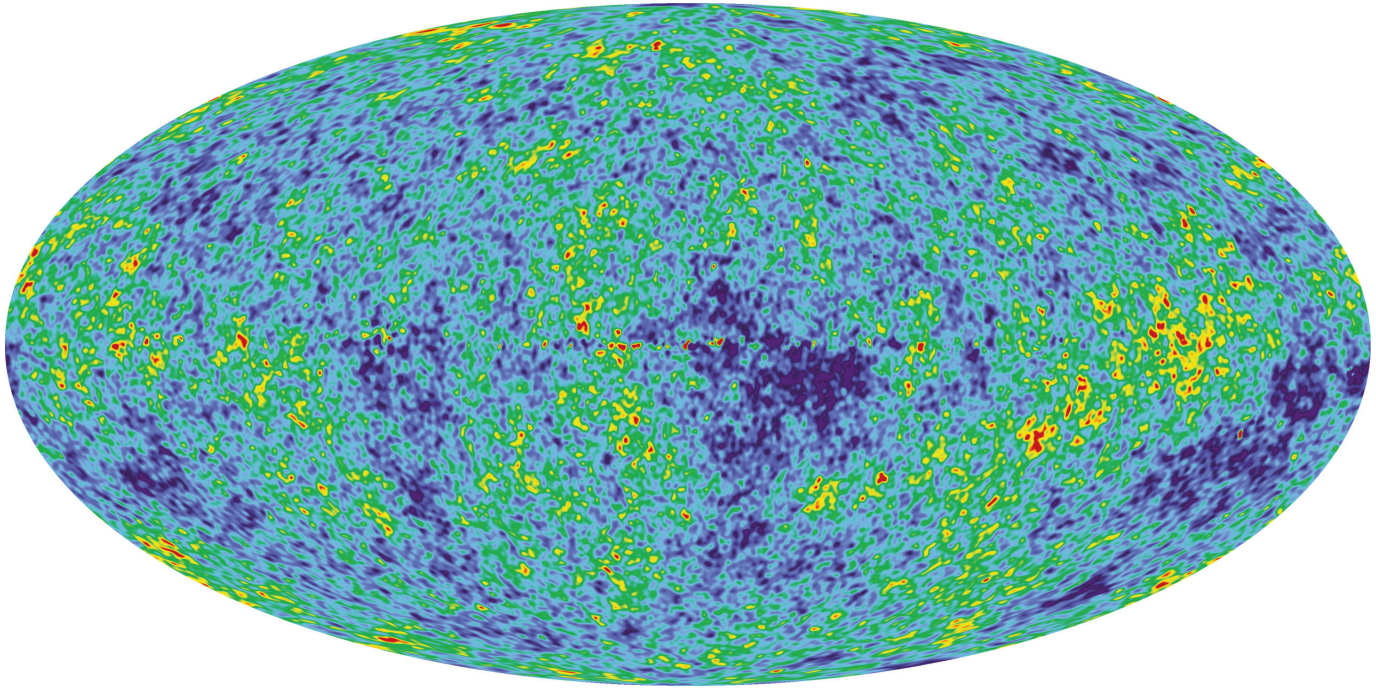


Imagen del fondo cósmico de microondas.

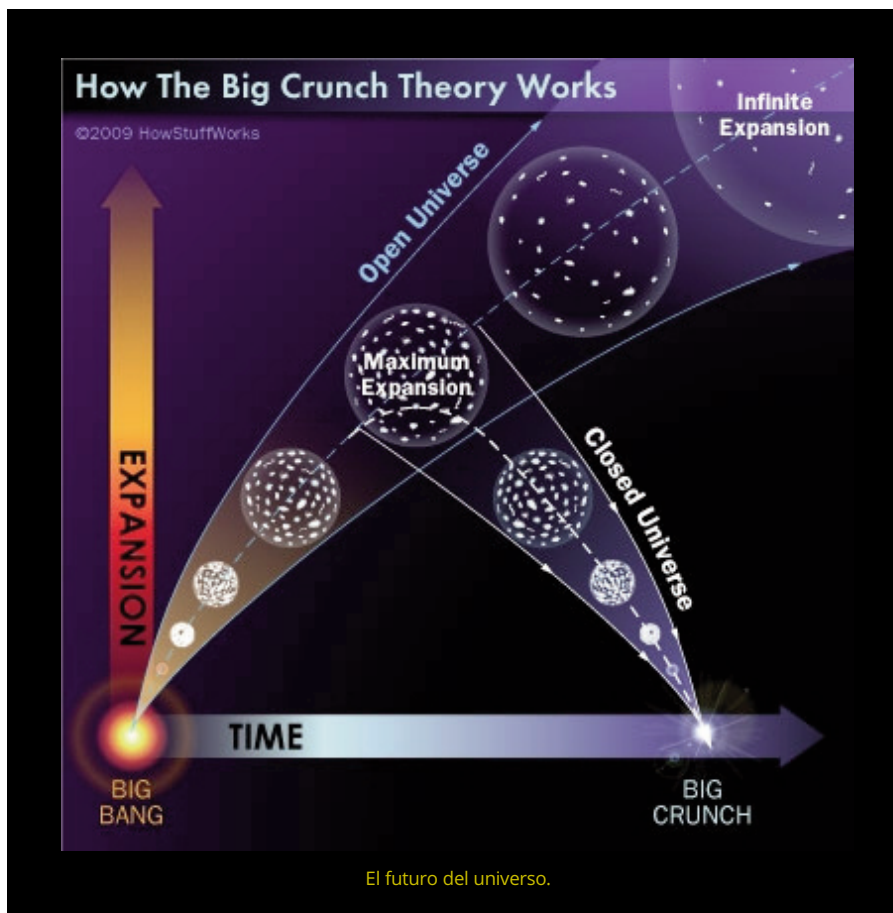
nada erróneo ya que depende de dónde esté situado el sistema de referencia. Se trata más bien de una cuestión de definir mejor la pregunta. Así pues, para los astrofísicos todo el universo observable se puede reducir a tres coordenadas: dos angulares, que definen la posición de un objeto sobre la proyección de la bóveda celeste, y otra que define la distancia a la que se encuentra de la Tierra. En esas condiciones, este sistema es equivalente a afirmar que la Tierra está en el centro y, de manera puramente práctica, todos los astrofísicos profesionales trabajamos en ese sistema de referencia que tiene como única motivación entender mejor las posiciones de todos los astros en relación a nosotros.

Desde ese punto de vista geocéntrico, el universo tendría un radio de 13.720 millones de años luz. No es un radio constante, sino que va aumentando de manera progresiva debido a la expansión del universo. Es decir, y de nuevo quiero subrayar que solo desde nuestra perspectiva, parece que la esfera cuyo centro ocupamos se expande mientras parece que nosotros estamos quietos en su centro. En el límite del universo hay una barrera observacional que está ocupada por lo que se llama el fondo cósmico de microondas, una emisión tremendamente homogénea que ocupa el límite de esa gigantesca esfera que nos rodea y que no

puede ser atravesada por ningún observatorio terrestre. La observación de ese fondo nos ha ayudado a entender muchas cosas sobre la geometría actual y el pasado de nuestro universo, ayudándonos a comprender que, en realidad, lo que vemos no es sino el resto de lo que fue un universo mucho más comprimido y que sigue en expansión. Lo que vemos es solo el eco de la época en que el universo no era transparente porque la densidad de partículas era demasiado grande para que los fotones se movieran libremente, lo que ocurrió solo 300.000 años después del Big Bang. De hecho, la radiación cósmica no tenía su máximo en el rango de frecuencias de las microondas, tal como se puede medir hoy en día, lo que correspondería a la emisión de un cuerpo que se encuentra unos tres grados Kelvin sobre el cero absoluto (unos 270 grados centígrados bajo cero), sino a un rango más energético correspondiente a la emisión de un cuerpo a una temperatura de tres mil grados. Sin embargo, debido a la expansión del universo, los fotones que han recorrido toda esa distancia han perdido la mayor parte de su energía a causa de la diferencia de velocidades entre el emisor y el receptor. Por cierto, conviene siempre recordar que esa pérdida de energía se produce en los rayos luminosos solo en la frecuencia y no en su velocidad, como ya postuló

Albert Einstein en la teoría especial de la relatividad.

Entonces, el universo hace 13.720 millones de años era mucho más pequeño y, en realidad, nosotros no ocupamos su centro, sino que su forma aparente es solo fruto de que tiene una edad limitada y la velocidad de la luz es finita, aunque muy grande, por eso parece lo que parece. Pero entonces, ¿de dónde sale la famosa cifra de los 93.000 millones de años luz? Lo cierto es que, en el transcurso de tiempo durante el que los fotones de esas regiones que ocupan el límite de nuestro universo observacional, ese que nos parece una esfera cuyo centro es ocupado por nosotros, han viajado, al universo le ha dado tiempo a expandirse, por lo que lo que nosotros vemos no se corresponde ni al aspecto ni a las distancias espaciales que apreciamos. De hecho, tomando en cuenta los distintos ritmos de expansión que ha seguido el universo durante toda su historia, se calcula que ese límite debería encontrarse ahora a unos 46.500 millones de años luz, es decir, que el universo observacional tendría ahora un diámetro de 93.000 millones de años luz. Obviamente no sabemos, ni podemos saber, al menos en lo que a la información que puede ser transmitida a partir de la luz, qué aspecto tiene esa otra parte del universo en este momento, y para saberlo tendríamos que

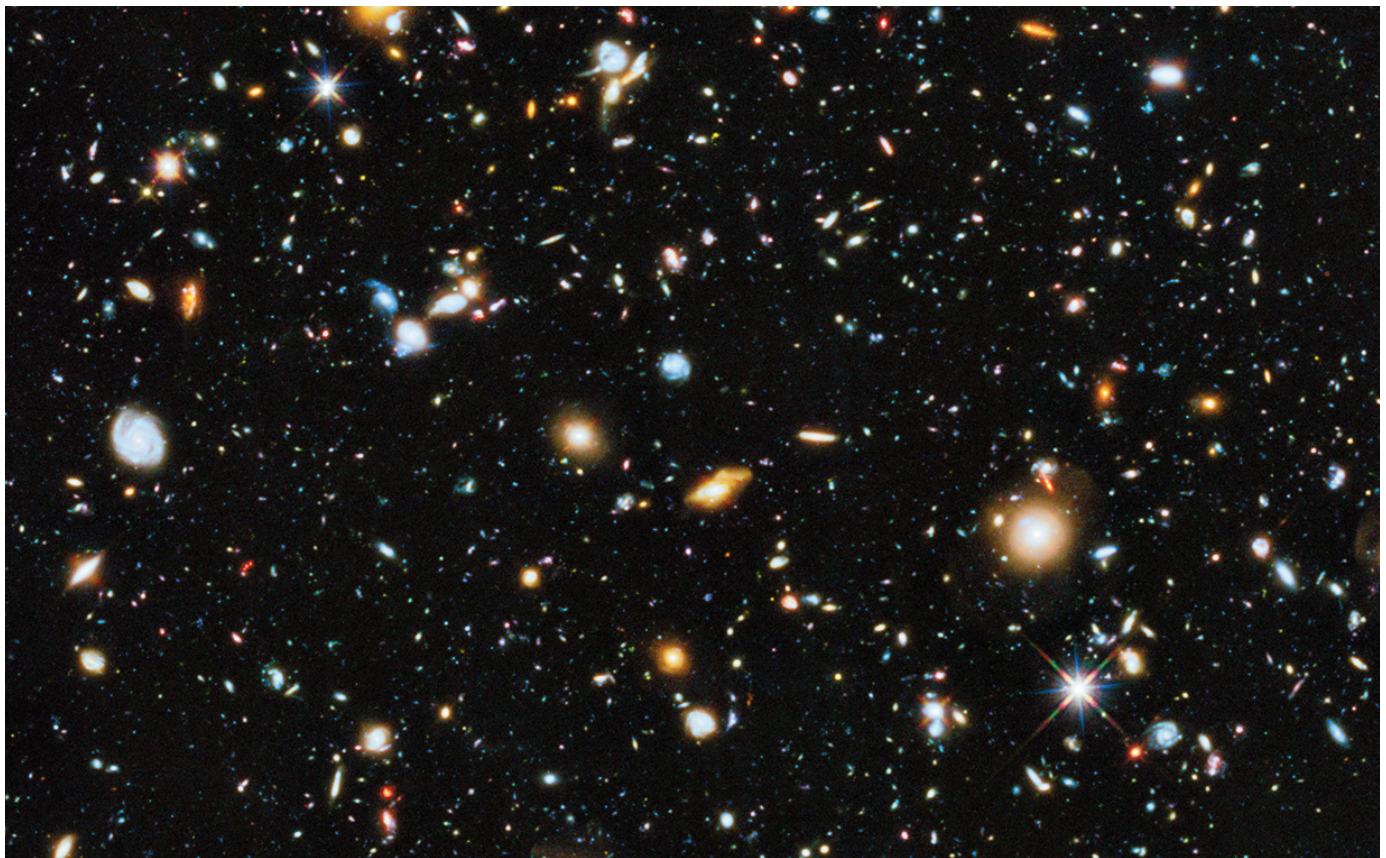


esperar 46.500 millones de años; claro que, para entonces, ya estará mucho más lejos. Esto tiene dos consideraciones muy relevantes sobre la forma actual del universo. La primera y más importante es que postulamos esa cifra teniendo en cuenta solo la edad actual del universo y su ritmo de expansión, pero no tenemos en cuenta en absoluto su tamaño real. Es decir, no sabemos y no podemos saber si el universo es mucho más grande que esa cifra, sino que es fruto de fijar el límite actual del universo observacional. Por tanto, el libro de mi hija debería decir más bien que no sabemos la forma y tamaño del universo, ni tampoco si es infinito, pero que debería tener por lo menos un diámetro de 93.000 millones de años luz, lo cual es muy distinto a lo que dice en realidad. En todo caso, esa cifra es anecdótica y no ayuda mucho a entender cómo es el universo hoy en día. De hecho, los astrofísicos y cosmólogos no la tienen en cuenta para nada y se trabaja más bien con las distancias que son trazadas por la luz, es decir, distancia más tiempo pasado y no dónde se encontraría el emisor en la actualidad. La otra consideración importante es que, si han pasado 13.720 millones de años

desde el Big Bang, y en la actualidad las regiones más alejadas que podemos observar en esa época están a 46.500 millones de años luz, entonces esas regiones se han expandido forzosamente a una velocidad mayor que la de la luz y, citando nuevamente a la relatividad especial de Einstein, eso no debería ser posible. Bueno, esto tiene truco, porque Einstein afirmó que los cuerpos materiales no pueden ir más rápido que la luz, pero no afirmó nada acerca de la velocidad del propio tejido del espaciotiempo, que es lo que se está expandiendo en realidad. Lo que está en su interior simplemente se deja llevar por esa expansión. Todo esto está muy bien, pero ¿entonces el universo es infinito o no? Volviendo únicamente a consideraciones observacionales, es decir, solo a aquello que podemos observar y medir, no lo podemos saber, sino que este límite inferior es el único que puede darse hasta ahora y no puede acotarse por encima porque no se puede observar nada más allá del límite observacional fijado por el fondo cósmico de microondas. A pesar de eso, y citando al eminente cosmólogo Lawrence Krauss, vivimos en una época privilegiada porque sí que tenemos

acceso observacional a aquellas estructuras cosmológicas, como el propio fondo de microondas o a otras galaxias cuya velocidad de expansión podemos medir, que nos han ayudado a reconocer un universo en expansión. Pasados muchos miles de millones de años más, los futuros observadores no podrán ni siquiera observar estos elementos porque se encontrarán a una distancia y se moverán a una velocidad tales que eso impedirá que la luz llegue hasta ellos desde estos marcadores. Por tanto, es posible que deduzcan erróneamente que viven en un universo infinito y estacionario.

En todo caso, hay también otra forma de definir un universo infinito que no tiene que ver forzosamente con una ausencia reconocible de sus límites. A veces se habla, de una manera totalmente confusa a mi parecer, de una geometría abierta, plana o cerrada del universo. Estas palabras no tienen que ver demasiado con lo que nos sugieren sus significados más evidentes y son utilizadas por los cosmólogos en un contexto más amplio. Por ejemplo, cuando decimos que el universo es plano, no queremos decir en absoluto que sea una estructura espacial en dos dimensiones, pues esto queda claramente desmentido por nuestra experiencia cotidiana de vivir en un universo de tres dimensiones, o de cuatro si estamos dispuestos a admitir el tiempo como una dimensión más, aunque esto es más difícil de concebir. En realidad, el concepto de planitud tiene más que ver con un universo en el que las tres dimensiones del espacio son ortogonales entre sí, es decir, que los ejes que las definen son perpendiculares entre sí. De una manera más formal se dice que en un universo plano podemos aplicar los postulados de la geometría euclidiana, como por ejemplo afirmar que los ángulos de un triángulo suman 180 grados, por lo que el concepto de plano tiene más que ver con una ausencia de curvatura que con una ausencia de una tercera dimensión. Una de las dos alternativas a esta concepción geométrica plana que, por otro lado, es la que aceptamos de una forma más natural a través de nuestra experiencia cotidiana, es la de un universo cerrado, es decir, aquella en la que la materia y energía que contiene el universo le hace tener una geometría en la que las tres dimensiones convergen en el infinito. Esto es consecuencia de otra de las teorías de Einstein, en este caso la teoría general de la relatividad, que afirma que



Campo ultraprofundo del telescopio espacial Hubble.

esto es justo lo que ocurre con el espaciotiempo en torno a una distribución de masa con su campo gravitatorio. En ese caso podríamos hablar de un universo cerrado si admitimos que toda la materia y energía que hay en su interior lo curva hacia adentro, y podríamos hablar de un universo infinito ya que en un espacio lo bastante grande volveríamos a la misma posición, aunque nos movamos en línea recta, de manera similar a lo que ocurre en la superficie de la Tierra, pero con una dimensión más. Esto también tendría consecuencias sobre el futuro del propio universo, ya que la materia frenaría su expansión, revirtiéndola y haciendo que todo vuelva a concentrarse en un mismo punto original. De hecho, hay programas observacionales que tratan de probar esta geometría buscando objetos celestes muy alejados, es decir galaxias de las primeras épocas, que puedan encontrarse simultáneamente en direcciones opuestas del cielo, lo cual confirmaría esta hipótesis.

La otra posibilidad, la de un universo abierto, es aquella en que la expansión del universo pesa mucho más, lo que haría que los ejes que definen las tres dimensiones del espacio diverjan en una geometría que suele ser ilustrada con

una silla de montar, algo tampoco nada intuitivo. En resumen, en este caso las líneas de un plano se van alejando, en vez de seguir paralelas o convergiendo, como en el caso de un universo cerrado. Al contrario que en este, esta geometría tiene implicaciones diferentes para el futuro del universo, ya que en este caso se expandiría indefinidamente. En todo caso, diferentes observaciones parecen indicar que nuestro universo es más bien plano o, mejor definido, ortogonal o euclidiano. Todos los componentes del mismo, incluyendo materia, tanto ordinaria como oscura, velocidad de expansión y energía oscura, que alimenta esta expansión, se combinan en unas proporciones tales que no afectan a la geometría del universo. De esta manera, tampoco podríamos decir que el universo observacional es infinito, aunque sí que parece que eso implica que nada podrá frenar finalmente su expansión indefinida.

Solo nos faltaría tratar de especular con lo que hay más allá del límite observacional del universo que sí podemos medir. Personalmente, me parece muy poco intuitivo pensar que nuestro universo no tiene límites, pero sí hay una idea rompedora que desafía nuestra con-

cepción actual, como es la de pensar que sí que puede haber otros universos más allá, lo cual no puede tampoco desmentirse de una manera clara. El argumento más sólido que apoya esta teoría por la cual podría haber otras “burbujas” enormes conteniendo otros universos más allá es la de que nuestro universo tiene unas condiciones muy excepcionales en sus proporciones y leyes físicas, las cuales han permitido que nosotros estemos aquí. Afirmar que hay otros universos más allá, con otras condiciones e incluso leyes, y que nosotros solo vemos este porque es el único en el que podemos estar, tendría bastante más sentido que afirmar que solo hay uno y que ese uno tiene las condiciones perfectas para albergar vida en el mismo. En todo caso, estas consideraciones trascienden el contexto científico, que solo puede constreñirse a aquello que podemos mirar y observar y ese límite, lamentablemente, está ahora mismo muy bien definido, por mucho que sepamos que tiene que haber algo más allá. Por lo menos dejemos claro el límite de nuestra ignorancia y no lo postulemos como el límite máximo de todo lo que hay, tal como pretenden algunos libros de texto.

# NUEVOS PROYECTOS EN CALAR ALTO

El observatorio de Calar Alto es el mayor complejo observacional de astronomía óptica de la península y de la Europa continental, gestionado actualmente a partes iguales por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) —a través del IAA-CSIC, centro Severo Ochoa— y la Junta de Andalucía —a través de la Secretaría General de Universidades—. Desde que en 2004 fuera declarado Infraestructura Científica y Técnica Singular (ICTS) del Ministerio de Ciencia e Innovación, debe dedicar un mínimo del 20% del tiempo de los telescopios de 2.2 y 3.5 metros a tiempo abierto, o propuestas de observación que respondan a una convocatoria pública semestral.

El tiempo de observación restante se dedica a programas que requieren hasta cientos de noches a lo largo de varios años, cuyo objetivo es el estudio de muestras de muchos objetos, o el seguimiento continuado a lo largo del tiempo de muestras más reducidas. Estos programas producen bases de datos abiertas a toda la comunidad astronómica, a modo de legado, que puedan servir para resolver cuestiones científicas distintas a las que inicialmente motivaron su puesta en marcha, lo que amplía su repercusión científica.

La organización de tales proyectos exige una minuciosa preparación y requiere de grandes colaboraciones internacionales, que aporten su experiencia desde el punto de vista astronómico, técnico y observacional. Además, se requiere una gran dedicación por parte del personal del observatorio para poder completar este tipo de programas en las condiciones idóneas. Estos programas de legado constituyen una de las señas de identidad del Observatorio de Calar Alto, así como una de nuestras fortalezas.

Calar Alto lleva años apostando por programas de legado, que comenzaron con dos grandes rastreos cosmológicos —ALHAMBRA y CALIFA—, y a los que ha seguido el programa de búsqueda de exoplanetas con el espectrógrafo CARMENES, que ha permitido confirmar y descubrir decenas de planetas alrededor de otros soles.

En enero de 2021 han comenzado tres nuevos programas de legado en el telescopio de 3.5 metros, que ocuparán más de cien noches de observación cada semestre durante los próximos años. Fueron seleccionados de entre un total de siete, según las recomendaciones del comité científico asesor (SAC) de Calar Alto, compuesto por personal investigador de renombre internacional e independiente.

A dicha convocatoria respondieron además cinco nuevos conceptos instrumentales para los telescopios de 2.2 y 3.5 metros. Dos de estos proyectos instrumentales, ambos para el telescopio de 3.5 metros, fueron seleccionados para su estudio de viabilidad que finalizará el 30 de abril. Esta nueva instrumentación permitirá mantener el telescopio más grande del viejo continente a la vanguardia de la tecnología y de la producción científica durante las dos próximas décadas.

Estos cinco nuevos proyectos observacionales e instrumentales van a marcar la estrategia científica y tecnológica de los próximos años, posicionando a Calar Alto en un lugar muy destacado de la astrofísica moderna. Todos están coliderados por equipos afincados en Andalucía, potenciando la presencia de las instituciones de esta comunidad autónoma en el desarrollo del observatorio.

## PROGRAMAS DE LEGADO ACTUALMENTE EN CURSO

El telescopio de 3.5 metros es capaz de resolver detalles en galaxias localizadas a cientos de millones de años luz con el espectrógrafo PMAS (*Postdam Multi-Aperture Spectrophotometer*). Este espectrógrafo, instalado en 2001, consta de una unidad de campo integral (IFU) que permite recuperar simultáneamente toda la información espectral en un área del cielo que contiene estas galaxias en toda su extensión.

Pero también es capaz de estudiar, en una esfera de unas decenas de años luz alrededor del Sol, nuestro vecindario en la Vía Láctea, como las estrellas más cercanas que pueden estar rodeadas por su propio cortejo planetario. El instrumento CARMENES (*Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exo-earths with Near-infrared and optical Échelle Spectrographs*), en funcionamiento desde 2016, es un espectrógrafo visible e infrarrojo codesarrollado por el IAA-CSIC, especializado en la caza de exoplanetas.

Con estos dos instrumentos se están desarrollando actualmente los tres programas de legado anteriormente mencionados, que abarcan dos de los temas más candentes de la astrofísica contemporánea: la existencia de sistemas planetarios fuera de nuestro Sistema Solar y la distribución a gran escala de las galaxias en el universo.

# DECONSTRUCCIÓN

GILLES BERGOND (OBSERVATORIO DE CALAR ALTO) Y JORGE IGLESIAS (IAA-CSIC)

## CAVITY (CALAR ALTO VOID INTEGRAL-FIELD TREASURY SURVEY)

Liderado por la Universidad de Granada, CAVITY llevará a cabo un muestreo exhaustivo de las galaxias que pueblan las zonas más vacías y deshabitadas del universo local –los denominados *voids* (o vacíos)–, empleando para ello el espectrógrafo de campo integral PMAS.

A gran escala, la distribución de galaxias en el universo es parecida a una esponja, con la mayoría de las galaxias concentradas en grupos y cúmulos, conectados entre sí por filamentos. Solo una pequeña fracción de las galaxias se localizan en los *voids*. CAVITY es el primer estudio detallado y sistemático de galaxias localizadas en estos entornos de más baja densidad del universo local.

Las galaxias de CAVITY han evolucionado supuestamente sin interactuar con galaxias vecinas, y su estudio aportará datos

inéditos sobre la formación y la evolución de estas galaxias, que se confrontarán con los modelos cosmológicos más recientes. En particular, CAVITY permitirá conocer si los agujeros negros de las galaxias solitarias muestran características diferentes a los de las galaxias en entornos más densos donde son omnipresentes.

El logotipo de CAVITY muestra a una galaxia espiral encerrada en una geoda, en referencia a la geoda de Pulpí; este lugar único de la provincia de Almería alberga, en el fondo de una mina desafectada, la mayor geoda de cristales de yeso de Europa. CAVITY observará más de un centenar de esas galaxias aisladas “en su cueva” a lo largo de un mínimo de cuatro semestres de observación, durante las noches más oscuras alrededor de cada luna nueva.

## KOBE (K-DWARFS ORBITED BY HABITABLE EXO-PLANETS)

Este proyecto, liderado por el Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), utilizará CARMENES para detectar y caracterizar exoplanetas potencialmente habitables (es decir, susceptibles de tener agua líquida en su superficie) en una gran muestra de estrellas enanas de tipo K. Estas estrellas tienen una masa intermedia entre el Sol y las estrellas más frías, las enanas de tipo M. Hasta ahora, esas últimas han sido las dianas privilegiadas de CARMENES por facilitar la detección de planetas poco masivos, del orden de la masa terrestre, alrededor de las enanas M, utilizando el método de variación de la velocidad radial.

Gracias a la alta sensibilidad y estabilidad de CARMENES, se puede efectivamente detectar el sutil bamboleo de hasta un metro por segundo (¡la velocidad de una persona andando!) que produce un planeta orbitando alrededor de su estrella.

KOBE podrá detectar decenas de planetas de tipo supertierra

(hasta diez veces la masa terrestre) alrededor de unas cincuenta enanas K situadas en el vecindario solar. Estas estrellas presentan la gran ventaja de ser más tranquilas que las enanas M, más activas y con numerosas erupciones violentas (mucho más que las peores tormentas solares que perturban nuestras comunicaciones terrestres), lo que limita la posibilidad de mantener condiciones estables para la vida, incluso para planetas en su zona habitable. Además, esta actividad complica la detección de planetas, cuya señal en los espectros puede confundirse con la propia actividad estelar.

Según estudios recientes, las supertierras situadas en la zona de habitabilidad alrededor de estrellas de tipo K podrían ofrecer condiciones incluso más favorables a la existencia de vida que las de nuestro propio planeta. KOBE buscará los mejores candidatos a supertierras habitables en esas estrellas hermanas pequeñas del Sol durante un mínimo de dos años.

## CARMENES LEGACY-PLUS (Y MEJORA INSTRUMENTAL CARMENES+)

El tercer programa de legado, CARMENES Legacy-plus, está liderado por el IAA-CSIC y el Instituto de Ciencias del Espacio (ICE-CSIC). Es la continuación natural y la ampliación de las exitosas observaciones de tiempo garantizado con el instrumento CARMENES, que han acumulado casi 800 noches útiles de observación durante cinco años. Está pensado como un monitoreo exhaustivo de unas 350 enanas M para detectar y caracterizar sus exoplanetas, durante 300 noches, con el instrumento CARMENES.

Desde el IAA-CSIC, y en estrecha colaboración con los técnicos e ingenieros de Calar Alto, se llevará a cabo a partir de este año una actualización de CARMENES para perfeccionar aún más la estabilidad de su canal infrarrojo (el canal visible ya llega a precisiones del metro por segundo). Esta mejora instrumental, denominada CARMENES+, permitirá ampliar su exitosa búsqueda de planetas rocosos a una nueva muestra de estrellas enanas M, además de

afinar su capacidad de detección y caracterización de posibles atmósferas, que es el siguiente reto observacional en materia de exoplanetas.

El estudio de la atmósfera de un planeta es posible cuando, gracias a un alineamiento fortuito con la Tierra, este pasa en tránsito por delante de su estrella. Durante este minieclipse, CARMENES puede detectar, por espectroscopía de absorción, los átomos y moléculas presentes en la atmósfera del exoplaneta. De hecho, ya se ha conseguido detectar con CARMENES helio en la atmósfera de varios planetas transitando delante de su estrella. CARMENES sigue siendo un instrumento único en el mundo, por su amplia cobertura en longitud de onda, desde el visible hasta el infrarrojo cercano, y con las notables mejoras que aportará CARMENES+ muy pronto, el éxito del legado Legacy-plus está asegurado.

CONTINÚA EN LA PÁGINA SIGUIENTE

# NUEVA INSTRUMENTACIÓN PARA EL TELESCOPIO DE 3.5 METROS

Para mantener su instrumentación a la vanguardia de la tecnología, el SAC de Calar Alto preseleccionó dos de los nuevos conceptos instrumentales: GAMAICA y TARSIS. Según el resultado del estudio de viabilidad y una última recomendación del SAC, el comité ejecutivo de Calar Alto decidirá finalmente cuál de ellos será elegido. Ambos conceptos corresponden a espectrógrafos de campo integral, aunque difieren notablemente tanto por sus características tecnológicas como por su motivación científica.

## GAMAICA (*GALAXY MAPPER INSTRUMENT AT CALAR ALTO*)

Coliderado por el IAA-CSIC y el instituto Leibniz de Astrofísica de Postdam (AIP) en Alemania, GAMAICA consta de múltiples espectrógrafos de diseño modular, cubrirá un campo de visión de ~1 minuto de arco cuadrado y está pensado para el estudio a alta resolución espacial de dos pilares de la astronomía extragaláctica: Andrómeda, hermana mayor de la Vía Láctea y vecina nuestra a tan solo 2.5 millones de años luz; y Virgo, el cúmulo de galaxias más cercano, a unos sesenta millones de años luz. Entre sus objetivos científicos se hallan el estudio detallado de la formación de las poblaciones estelares en estas galaxias, así como su relación con el medio interestelar e intergaláctico.

## TARSIS (*TETRA-ARMED SUPER-IFU SPECTROGRAPH SURVEY*)

Este proyecto está coliderado por la Universidad Complutense de Madrid y el IAA-CSIC. Se trata de un espectrógrafo con cuatro brazos, tres de ellos optimizados para el azul (llegando incluso al ultravioleta, un rango casi inexplorado para IFUs en tierra), y un cuarto brazo optimizado para longitudes de onda rojas, con lo que se cubriría todo el rango visible de una vez en un campo de visión de ~8 minutos de arco cuadrados. TARSIS y su programa de legado asociado, CATARSIS, se centrarán en estudiar las propiedades de las galaxias en cúmulos y filamentos, donde tendrían lugar no pocos fenómenos evolutivos, a distancias de miles de millones de años luz.

El instrumento elegido tomará, de forma natural, el relevo de PMAS para observar su programa de legado asociado, así como múltiples programas de tiempo abierto. De esta forma se prolongará la reconocida fama de Calar Alto en el campo (¡integral!), tras el éxito ya reconocido de CALIFA, y el previsiblemente por llegar de CAVITY, gracias a PMAS.

Y gracias a CARMENES(+), los nuevos mundos ya descubiertos y por descubrir desde Calar Alto con Legacy-Plus y KOBE se sumarán a la lista de grandes legados de un observatorio comprometido con las comunidades científicas andaluza, nacional e internacional.



Telescopio de 3.5 metros, con los logos de los tres legados en curso y de los dos diseños instrumentales en fase de estudio. Crédito: Pedro Amado y Marco Azzaro.

## Nancy Boggess, una astrónoma en la NASA

POR JOSEFA MASEGOSA (IAA-CSIC)

Nancy Boggess fue la primera mujer que trabajó en la agencia espacial norteamericana NASA, a la que se incorporó en 1968. Obtuvo la licenciatura en matemáticas y música en el *Wheaton College* de Massachusetts y el grado de máster en matemáticas en el *Wellesley College*, una de las universidades privadas femeninas más prestigiosas de Estados Unidos. Se doctoró en astrofísica en la Universidad de Michigan, donde conoció a su marido Albert, que también trabajó como ingeniero en la NASA.

Durante la realización de su tesis doctoral, investigó el polvo en las regiones ionizadas de la galaxia irregular NGC 6822 y realizó un estudio comparativo de sus propiedades con las encontradas en nuestra Galaxia y en las Nubes de Magallanes, unas galaxias satélites de la Vía Láctea. Ya desde esta época temprana mostró gran interés por la astronomía infrarroja e incluso, antes de acabar su doctorado, comenzó a trabajar para la agencia espacial estadounidense, NASA, donde se incorporó definitivamente en 1968. Desde su incorporación mostró grandes habilidades y se especializó en el área de astronomía infrarroja hasta que, en 1983, fue nombrada responsable del programa espacial infrarrojo de la NASA. Lideró el Observatorio Kuiper y el satélite IRAS, que mapearon el universo en estas frecuencias. En esa época, su interés científico se centró más en la cosmología que en galaxias cercanas y de ahí surgió su implicación en el satélite COBE, *Cosmic Background Explorer*.

Entre 1980 y 1990 fue la científica encargada del satélite COBE, que ha cartografiado el fondo cósmico de radiación de microondas. Desde el descubrimiento, por Penzias y Wilson en 1964, de la radiación de fondo de microondas, se habían reali-

zando múltiples medidas desde tierra, con globos u otros instrumentos, tratando de medir el espectro y anisotropías de dicha radiación; pero estaba claro que para realizar las medidas con la precisión necesaria había que hacerlo desde el espacio. Cuando en 1974 un joven investigador postdoctoral, John Mather, le planteó a Nancy el problema de la medición detallada de la radiación de fondo para la cos-



Arriba, Nancy Boggess. Debajo, el satélite COBE.

mológia, para ella quedó inmediatamente claro que era un tema de la suficiente importancia como para que la NASA se embarcara en ello. COBE, lanzado a finales de 1989, fue el primer experimento de la NASA dedicado solamente a cosmolo-

gía. La descripción detallada del COBE se publicó en el artículo de Boggess, Mather y colaboradores en 1992 en el *Astrophysical Journal* (vol. 397, pag 420-429). Este experimento supuso la evidencia más robusta para confirmar la teoría del Big Bang sobre el origen del universo. Los hallazgos del satélite COBE fueron de tal importancia que merecieron el Premio Nobel de Física en 2006 por “el descubrimiento del espectro de cuerpo negro y sus anisotropías del fondo de radiación de microondas”.

Desafortunadamente, Nancy estaba ya jubilada y solo pudo compartir la alegría del reconocimiento a sus colaboradores. Los laureados fueron John Mather y George Smoot. En el discurso de John Mather en la entrega del premio Nobel se reconoce el papel decisivo jugado por Nancy Boggess para llevar a buen término el proyecto COBE. Él dice de ella, entre otras cosas, “ella apoyó de forma contundente el proyecto COBE incluso cuando otros astrónomos de la NASA no se interesaron por ello...”. Gracias a la lectura de este discurso yo descubrí

la existencia de esta mujer extraordinaria. Me pregunto cuántas otras científicas han quedado olvidadas en el desarrollo de los grandes retos científicos. Aunque, en general, en sus disertaciones en la entrega de los diferentes premios reconocen ampliamente el papel jugado por “ellas”, sin embargo una vez más su nombre se pierde para los cronistas de la ciencia. Prueba de ello es que no he podido encontrar demasiados datos biográficos sobre Nancy.

Se jubiló en 1993 y se retiró a Boulder (California), donde vivió con su marido Albert Boggess hasta su muerte el 29 de noviembre de 2019. Durante su jubilación se dedicó con su marido a su otra gran pasión, la observación de los pájaros. Ellos documentaron la observación del vuelo de unos ocho mil pájaros de diferentes partes del mundo.

# EL MOBY DICK DE...

## INSTRUMENTOS ASTRONÓMICOS INFRARROJOS

"**C**all me Conchi". Desde que recuerdo siempre me gustaron las matemáticas, el cacharreo y el cielo estrellado, en ese orden. Y sin pensar mucho en qué quería ser "de mayor" me metí en físicas, disfruté con las prácticas experimentales y sufrí con otras asignaturas que me importaban poco. Así que cuando me ofrecieron enrolarme en el laboratorio de óptica del IAA, pues me dije: "... tiene las tres cosas que me gustan, de seguro que algo aprendo". Y ahí empecé. Mi interés en hacer aparatos, instrumentos que otros puedan usar para hacer ciencia, creció. Los números, los números me vuelven loca, y más el poder hacer esos números realidad. Los retos de concebir, desde la idea inicial, esa tormenta de ideas, de requerimientos no posibles, o sí posibles hasta cierto alcance; desde los deseos de lo que se quiere hacer, traducirlo en algo tangible primero y luego diseñarlo, hacerlo "fabricable", construirlo, construirlo; y ver que lo que hemos calculado funciona, y funciona como debe, como se quería, y siga funcionando hasta sacarle mucho rendimiento. Eso es lo mejor. Y, como óptica, tengo el privilegio de empezar desde el principio del proyecto y hacer realidad el concepto.

### LA CÁMARA PANIC

Luego, un osado capitán, Julio Rodríguez, me ofreció enrolarme en otro barco, llamado PANIC, y ahí ser responsable del paquete de óptica, y acepté. Quien no me conozca, pensará aquí, que mi *Moby Dick* ha sido PANIC, que tantas alegrías me ha proporcionado, y que ha sido clave para mi especialización en el desarrollo de instrumentación astronómica infrarroja. PANIC puede operar en los telescopios de 2.2 y 3.5 metros de apertura del Observatorio de Calar Alto y pertenece a la nueva generación de cámaras infrarrojas de gran campo para telescopios terrestres. Sus particularidades la hacen única dentro del restringido número de instrumentos de este tipo que existen en la actualidad. El desarrollo de la cámara comprendía varios retos importantes, debidos al extenso campo de

## ...CONCEPCIÓN CÁRDENAS (MPIA)



Natural de Guadix (Granada), licenciada en Físicas y doctorada por la Universidad de Granada. Trabajó durante 16 años en el IAA-CSIC donde, entre otras tareas, ha sido responsable de los paquetes de óptica de la cámara PANIC y del canal infrarrojo del espectrógrafo CARMENES. Desde 2016 es ingeniera óptica senior en el Instituto Max Planck de Astronomía (MPIA). Ahora su principal proyecto es el instrumento METIS para el Telescopio Extremadamente Grande (ELT).



Imagen de campo de la cámara PANIC.

visión, 30 minutos de arco (tanto como la luna llena), y al rango espectral deseado (infrarrojo cercano). Entre ellos, el desafío de diseñar lentes de gran tamaño, la optimización de un sistema con aberraciones muy severas fuera de eje y, a la par, la minimización de las aberraciones cromáticas debido al amplio rango espectral. Se trata de un instrumento criogénico (a 178 grados bajo cero), y que además opera acoplado al foco Cassegrain del telescopio, con el reto añadido de doblar el camino óptico para empaquetar el instrumento dentro de un espacio y peso muy acotados.

### CARMENES, CAZADOR DE TIERRAS

Sin embargo, el tercer barco en el que me enrolaron, CARMENES, fue donde nos topamos con la persecución del gran cachalote blanco. Ahora el capitán Ahab de este barco era el mismo Instituto de Astrofísica de Andalucía, que se comprometía a desarrollar el canal infrarrojo de este espectrógrafo cazador de planetas, en un plazo récord y sin todos los recursos de su parte. Y con este capitán nos vimos envueltos en una obsesiva aventura en la que, si no se terminaba el instrumento en el plazo acordado, toda la tripulación sería culpable del declive y cierre del Observatorio de Calar Alto. CARMENES busca, en particular, exoterras en la zona de habitabilidad de enanas rojas, y lo hace observando simultáneamente en el visible y en el infrarrojo. Su

éxito se basa en su alta precisión al detectar variaciones de velocidad en el movimiento de esas estrellas. Para conseguir esa alta precisión ha sido necesario un robusto y escrupuloso diseño óptico, mecánico y criogénico, que están permitiendo hoy en día a los investigadores el descubrimiento de planetas potencialmente habitables.

¡Y lo conseguimos! Yo, como responsable del paquete de óptica, que ahora era un espectrógrafo infrarrojo de alta resolución, con una red de difracción Echelle gigante, con dispersión cruzada y un mosaico de dos detectores infrarrojos, para cazar los espectros de esas estrellas cuando el instrumento fuese puesto en funcionamiento en el telescopio de 3.5 m de apertura de Calar Alto. Nuestro tenaz arponero era Santiago Becerril, responsable de la mecánica, de la criogenia, y de lo que hiciese falta en el reto del día a día. Y, todo el equipo como uno, lo conseguimos. Y también todos perdimos algo en el camino. La tripulación cumplió su cometido. El capitán dio la enhorabuena a la tripulación pero no cumplió sus promesas de compensación. A instrumento funcionando en telescopio, ¿a quién le importan las promesas pasadas? Nuestro instrumento funcionó, funciona. El observatorio no caería. Un final feliz y agrídulce.

No era mi Moby Dick, pero ese canal infrarrojo se convirtió en el objeto que cambió el rumbo de mi vida. Ese trabajo desafiante, por un lado cargado de satisfacciones personales y logros y, por otro, autodestructivo, estresante y que profesionalmente me hizo decidir dejar de luchar contra el sistema y enrolarme en otro barco más lejano. Gracias a ello, o por su culpa, ahora me encuentro en METIS, desarrollando dos de sus instrumentos. Mis nuevas criaturas, que verán la luz en esta década y que espero ver hechas realidad, son: un *imager* (que trabaja en el infrarrojo hasta 14 micras con un campo de visión de 11 segundos de arco) y un sensor de frente de onda criogénico tipo pirámide, que operará en la banda K y que será el primero de su especie.



## Se detectan rápidos estallidos de radio en nuestra Galaxia

**LOS ESTUDIOS APUNTAN A QUE UN MAGNETAR, UNA ESTRELLA DE NEUTRONES CON UN CAMPO MAGNÉTICO MUY INTENSO, SE HALLARÍA TRAS ESTE FENÓMENO**

Uno de los fenómenos más estudiados en astrofísica a día de hoy son las denominadas fuentes transitorias, objetos astrofísicos que no presentan una emisión permanente en el tiempo sino que emiten luz de forma breve, intensa y repentina. Entre ellos destacan las ráfagas de radio rápidas (o FRBs, su acrónimo en inglés), que se conocen desde 2007 pero cuyo origen es aún incierto. Tres estudios que se publicaban simultáneamente en la revista *Nature*, uno de ellos con participación de investigadores del IAA-CSIC, difundían la detección de este tipo de ráfagas y su seguimiento desde distintos observatorios, tanto terrestres como espaciales; los resultados sugieren que se originaron en un magnetar, una estrella de neutrones con un campo magnético muy intenso, situado en nuestra galaxia, la Vía Láctea.

Conocer la fuente de las ráfagas de

radio rápidas, fundamental para comprender la física subyacente, constituye un desafío: son impredecibles y de muy corta duración (apenas unos milisegundos), de modo que su detección precisa de telescopios que realicen cartografiados de grandes regiones del cielo. Existen numerosas hipótesis sobre su naturaleza, pero uno de los candidatos claros son las estrellas de neutrones, objetos muy compactos y de rápida rotación que surgen cuando una estrella muy masiva expulsa su envoltura en una explosión de supernova. Se trata de fuentes extremadamente intensas, y la mayoría de las detectadas hasta la fecha apuntan a que se trata de objetos extragalácticos, situados fuera de la Vía Láctea.

Los tres estudios independientes sugieren que un magnetar, una estrella de neutrones con un campo magnético extremadamente intenso, es la fuente originaria de las rápidas ráfagas de radio denominada FRB 200428. Pero se trataría de una fuente local, situada en la Vía Láctea.

El 28 de abril de 2020, los observatorios CHIME (Canadá) y STARE2 (Estados Unidos) detectaron una ráfaga de radio rápida procedente de la misma región del cielo. Los dos equipos la asociaron a un magnetar ya conocido, denominado SGR 1935+2154 y localizado en nuestra



propia Galaxia, y que además coincidió en el tiempo con una explosión de rayos X procedente del mismo objeto. Esa región del cielo fue monitoreada por el radiotelescopio FAST (China) y, aunque no detectó el objeto en radio, realizó observaciones profundas imponiendo límites superiores estrictos en la emisión en radio durante veintinueve ráfagas de rayos gamma altamente energéticos producidos por el magnetar, lo que implica que las rápidas ráfagas de radio asociadas con las ráfagas cortas de rayos gamma son extremadamente inusuales.

Investigadores del IAA-CSIC partici-

paban en uno de los artículos con observaciones de la región del magnetar tomadas con red de telescopios robóticos BOOTES, cuyo desarrollo encabeza el IAA-CSIC. En particular, los datos de BOO-2 (Málaga), BOO-3 (Nueva Zelanda) y BOO-4 (China) impusieron límites a la emisión óptica incluso de manera simultánea a la de radio, lo que ha podido resultar en un modelo más adecuado del entorno del magnetar y de los procesos físicos subyacentes.

Este trabajo apunta a que los magnetares podrían ser los responsables de una considerable fracción de estas rápidas ráfagas de radio.

## La misión Ariel (ESA) comienza su fase de ejecución

**CON LANZAMIENTO PREVISTO PARA 2029, ARIEL HA PASADO DE LA FASE DE ESTUDIO A LA DE IMPLEMENTACIÓN**

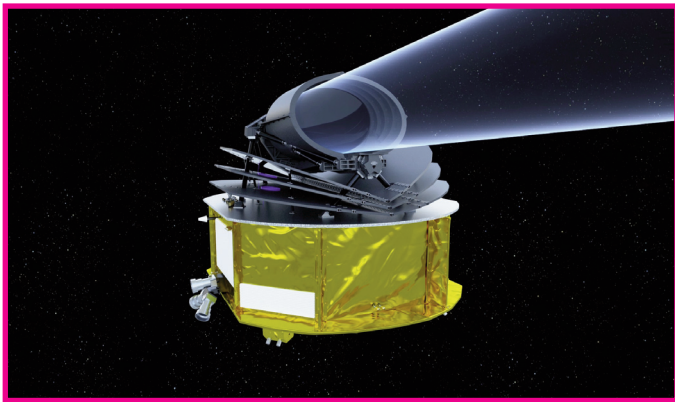
La misión Ariel responde a uno de los objetivos principales del programa *Cosmic Vision* de la Agencia Espacial Europea (ESA), que busca conocer las condiciones para la formación de los planetas y para la emergencia de la vida. Ariel permitirá estudiar la compo-

sición de los planetas, cómo se forman y cómo evolucionan, analizando una muestra diversa de unas mil atmósferas planetarias de manera simultánea en el visible y en el infrarrojo.

“Ariel permitirá la ciencia planetaria mucho más allá de los límites de nues-

tro propio Sistema Solar”, señala Günther Hasinger, director de ciencia de la ESA.

“Se trata de la primera misión espacial dedicada exclusivamente al estudio de las atmósferas exoplanetarias, y sabemos que la atmósfera de un planeta es



clave para conocer su formación y evolución. Lejos queda ya la fase donde descubríamos nuevos planetas, e incluso aquella en la que se detectaba por primera vez vapor de agua, metano o dióxido de carbono en sus atmósferas. Con más de cuatro mil exoplanetas descubiertos hasta la fecha, entramos en la fase de entender y explicar su diversidad, no solo de los planetas en sí, sino en particular de sus atmósferas”, señala Manuel López Puertas, investigador del IAA-

CSIC que participa en la misión.

Ariel no solo estudiará la composición química y las estructuras térmicas de los planetas, sino que lo hará vinculándolas con el entorno de la estrella anfitriona. “Para conocer con exactitud datos básicos como el tamaño y la masa de los planetas necesitamos determinar con precisión los parámetros de su estrella. También, la información sobre la composición de la estrella anfitriona es clave para conocer la composición de los planetas

que se formaron en su seno y la migración de los mismos”, señala Camilla Danielski, investigadora del IAA-CSIC que participa en la misión. Esto cubrirá un vacío significativo en nuestro conocimiento sobre la relación entre la química del planeta y el entorno en el que se formó, o sobre si el tipo de estrella anfitriona determina la evolución del planeta.

Ariel empleará el método de los tránsitos y las ocultaciones, que estudian las señales que se producen cuando un planeta pasa por delante de su estrella o se oculta tras ella. La misión podrá detectar signos de compuestos bien conocidos en la atmósfera de los planetas, como vapor de agua, dióxido de carbono y metano. También detectará compuestos metálicos más exóticos para descifrar el entorno químico general del distante sistema solar. Para un grupo seleccionado de planetas, Ariel también realizará un estudio profundo de sus sistemas de nubes y estudiará las variaciones atmosféricas estacionales y diarias.

Ariel llevará la caracterización de exoplanetas al siguiente nivel al estudiar estos mundos distantes de manera individual y como poblaciones, y aportará un censo químico de cientos de sistemas solares que permitirá comprender mejor nuestro vecindario cósmico. La observación de estos mundos aportará luz sobre las primeras etapas de la formación planetaria y atmosférica, así como de su posterior evolución, y permitirá comprender cómo nuestro propio Sistema Solar encaja en la imagen más amplia de los sistemas planetarios.

Varios centros de investigación españoles participan en la misión, tanto desde el ámbito científico como tecnológico. Entre ellos se encuentra el Instituto de Astrofísica de Andalucía, que colabora en la vertiente científica a través de los grupos de trabajo denominados “Sinergias con los planetas del Sistema Solar” y “Caracterización estelar”, este último coordinado por Camilla Danielski (IAA-CSIC).

## MHONGOOSE comienza a estudiar el débil gas atómico que rodea a las galaxias, clave en su evolución

**MHONGOOSE, UN PROYECTO DE LEGADO DEL RADIOTELESCOPIO MEERKAT, PRECURSOR SUDAFRICANO DEL SKA, PRODUCE SUS PRIMEROS RESULTADOS**

MHONGOOSE (acrónimo en inglés de *Observaciones con MeerKAT del HI de Galaxias Cercanas – Observando Emisores del Sur*) es un proyecto de legado para el estudio de la distribución de hidrógeno atómico (HI) en una selección de galaxias cercanas usando el radiotelescopio MeerKAT (Sudáfrica). En el

marco de su fase de pruebas ha proporcionado ya sus primeros resultados científicos. Este primer trabajo, publicado en la revista *Astronomy & Astrophysics*, aporta nuevos hallazgos sobre la distribución de gas alrededor de la galaxia ESO 302-G014 y muestra el potencial del proyecto.

MHONGOOSE estudiará cómo las galaxias captan gas de su entorno y la relación entre el gas y la formación de estrellas. Para ello se estudiará la distribución de hidrógeno atómico (HI) en una muestra de 30 galaxias cercanas, ubicadas a menos de 65 millones de años luz de nuestra Vía Láctea. Las galaxias se han seleccionado de forma que cubran todas las inclinaciones, desde galaxias vistas de canto a galaxias de frente, y abarcan un rango muy amplio en

masa y luminosidad.

Esta variedad en la muestra permite abordar diversas preguntas sobre los procesos de transformación y evolución de las galaxias en el universo cercano. El proyecto ha obtenido 1650 horas de observación en el radiointerferómetro MeerKAT, un precursor de SKA (*Square Kilometre Array*) formado por 64 antenas situadas en el desierto del Karoo, en Sudáfrica. MeerKAT es, hasta que se construya SKA, el telescopio más eficiente para obtener el tipo de datos que se necesitan en MHONGOOSE.

### **NUBES DE GAS EN TORNO A UNA GALAXIA ENANA**

Los primeros resultados que proporciona MHONGOOSE corresponden

a la galaxia denominada ESO 302-G014, una galaxia enana cercana rica en gas. El equipo científico internacional responsable del trabajo, que cuenta con participación del IAA-CSIC, ha utilizado observaciones realizadas con MeerKAT, junto con datos complementarios en otras longitudes de onda, para investigar su historia evolutiva. Han encontrado que la galaxia tiene un disco externo asimétrico y poco denso, así como una cola de marea de hidrógeno atómico y una nube aislada a unos 6500 años luz de esta galaxia.

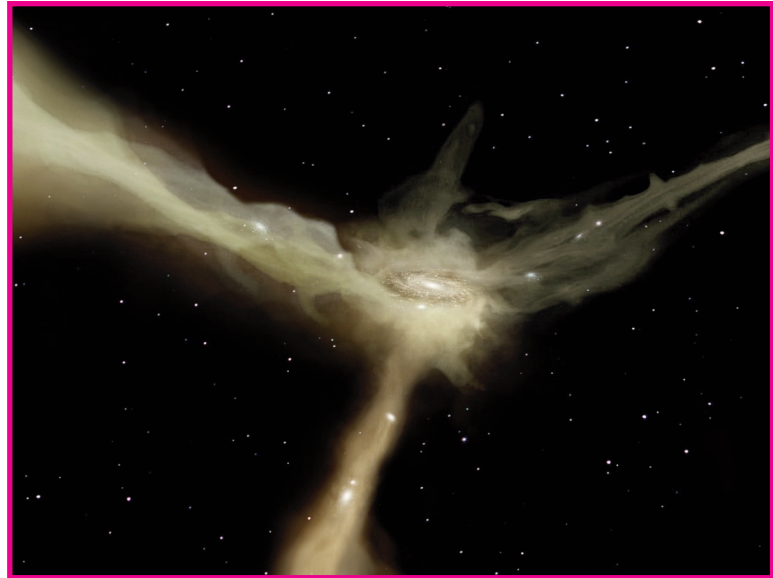
Estas estructuras, que no se habían detectado anteriormente, parecen indicar que la galaxia sufrió una interacción con otra de baja masa. Lourdes Verdes-Montenegro, investigadora científica del IAA y único

miembro español del equipo de MHONGOOSE, destaca que “los indicios detectados de una posible interacción con alguna galaxia de baja masa compañera se apoyan también en la presencia de cantidades significativas de gas molecular detectadas por el interferómetro ALMA y en la existencia de cúmulos estelares prominentes, que sugieren una formación estelar inducida recientemente”.

“Las imágenes profundas del *Dark Energy Camera Legacy Survey*, muestran un objeto débil y difuso próximo al extremo final del filamento, cuyo radio, brillo y color son

compatibles con el de una galaxia enana a una distancia similar a la de ESO 302-G014”, apunta Javier Román, investigador del IAA-CSIC experto en imágenes ópticas profundas que participa en el trabajo.

Estos resultados son, según Lourdes Verdes-Montenegro, “apenas un pequeño anticipo de lo que vendrá”, ya que se han obtenido con observaciones preliminares, y confía en que “las observaciones profundas de los objetos de la muestra de MHONGOOSE ofrecerán una visión del destino del gas atómico al transferirse del medio intergaláctico a las galaxias”.

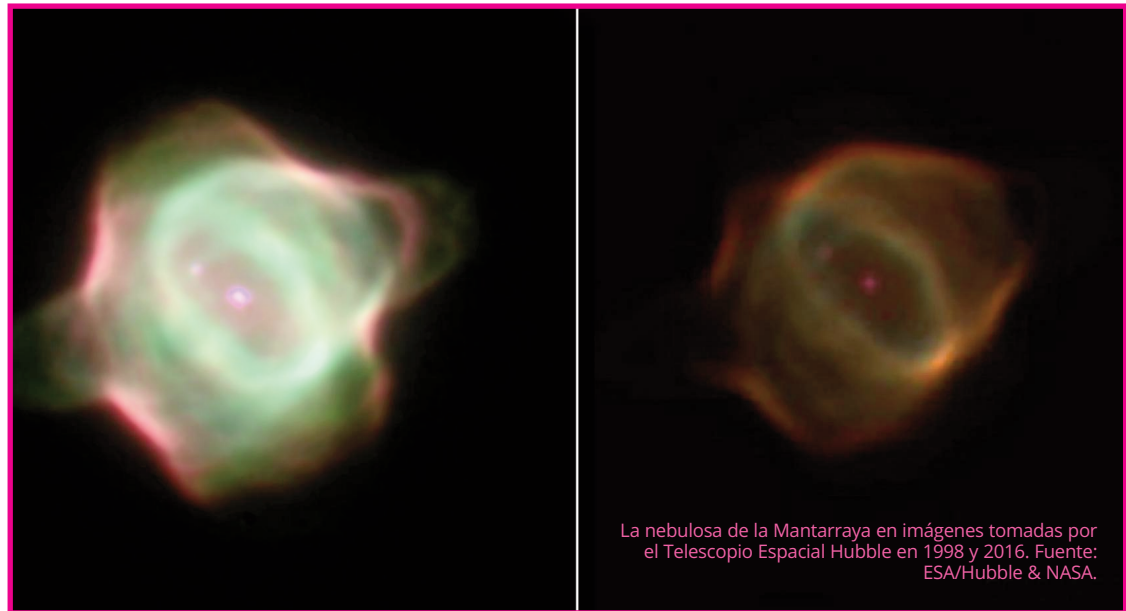


## La nebulosa de la Mantarraya, la más joven conocida, se apaga

**OBSERVACIONES CON EL TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE MUESTRAN CÓMO ESTA JOVEN NEBULOSA HA PERDIDO BRILLO Y CAMBIADO DE FORMA EN APENAS DOS DÉCADAS**

El ciclo de vida de las estrellas maneja escalas de tiempo que pueden parecer eternas: una estrella tarda millones de años en nacer, y su etapa adulta se extiende miles de millones de años. Si se trata de una estrella de masa baja o intermedia, como el Sol, llegará un momento en el que, agotado el hidrógeno del núcleo que le sirve de combustible, se dilatará y expulsará sus capas externas; y estas, iluminadas por el núcleo estelar, darán lugar a una nebulosa planetaria. Se trata de objetos bellísimos, que se expanden al tiempo que atenúan su brillo para acabar difuminándose en varias decenas de miles de años. Pero un estudio revela algo inédito: en apenas dos décadas, la nebulosa de la Mantarraya se ha apagado.

La nebulosa de la Mantarraya, o Hen3-



La nebulosa de la Mantarraya en imágenes tomadas por el Telescopio Espacial Hubble en 1998 y 2016. Fuente: ESA/Hubble & NASA.

1357, fue presentada como la nebulosa planetaria más joven conocida en 1998: se calculó que el núcleo de la estrella central apenas llevaba veinte años produciendo la energía suficiente como para ionizar la envoltura de gas que se había formado a raíz de la expulsión de las capas externas. Los datos mostraban, además, que la estrella central se había calentado más rápidamente de lo esperado teniendo

en cuenta su baja masa.

Su tamaño es equivalente a una décima parte de las dimensiones habituales de las nebulosas planetarias, pero las extravagancias de esta mantarraya cósmica no terminan ahí: ahora, un trabajo muestra que Hen3-1357 se ha desvanecido a lo largo de las últimas dos décadas, y que las capas de gas que rodean a la estrella central han perdido nitidez.

“Son cambios dramáticos y extraños”, apunta Martín A. Guerrero, investigador del IAA-CSIC que participa en la misión. “Estamos presenciando la evolución de una nebulosa en tiempo real, y vemos variaciones en pocos años. Nunca habíamos visto esto de forma tan clara”.

La comparación de las imágenes obtenidas por el Telescopio Espacial Hubble en 2016 y las que obtuvo en

1996 (y que permitieron observar su forma) muestra cómo la nebulosa ha perdido brillo y cambiado de forma. Los tentáculos y filamentos fluorescentes de gas de las regiones centrales casi han desaparecido, y los bordes curvilíneos que sugirieron su asociación con las mantarrayas prácticamente se han desvanecido.

## LA ESTRELLA QUE SE ENFRIÓ

Los investigadores han documentado cambios sin precedentes en la luz emitida por el nitrógeno, el hidrógeno y el oxígeno expulsados por la estrella

moribunda en el centro de la nebulosa. La emisión de oxígeno, en particular, disminuyó su brillo en un factor de casi mil entre 1996 y 2016.

“Se han visto cambios en las nebulosas antes, pero lo que tenemos aquí son cambios en la estructura fundamental de la nebulosa -señala Bruce Balick, investigador de la Universidad de Washington Seattle que encabeza la investigación-. En la mayoría de los casos, la nebulosa va ganando tamaño. Pero aquí está cambiando su forma y se está debilitando en una escala de tiempo sin precedentes. Además, no está creciendo; de hecho,

el anillo elíptico interior que fue brillante parece encogerse a medida que se desvanece”.

Las observaciones desde tierra habían mostrado señales de variabilidad en el brillo a lo largo del tiempo en otras nebulosas planetarias, pero esos indicios no se han podido confirmar hasta ahora. “Estamos muy, muy seguros de que esta nebulosa está cambiando de brillo con el tiempo”, apunta Martín A. Guerrero (IAA-CSIC).

Los investigadores señalan que los rápidos cambios de la nebulosa son una respuesta a su estrella central, SAO 244567, cuya temperatura super-

ficial se disparó hasta los 60.000 grados, diez veces la temperatura del Sol, en un breve periodo de tiempo entre 1971 y 2002. Desde entonces ha experimentado un descenso gradual hasta 22.000 grados, por lo que la estrella es incapaz de producir suficientes fotones para mantener ionizada la nebulosa. En 2016, un grupo de investigadores propuso que esta estrella habría experimentado un *flash* de helio, en el que una capa rica en helio inmediatamente bajo la superficie estelar entra en un súbito proceso de fusión, provocando la expansión y el enfriamiento de las capas superiores.

## RoadMap: estudiando el omnipresente pero aún desconocido polvo marciano

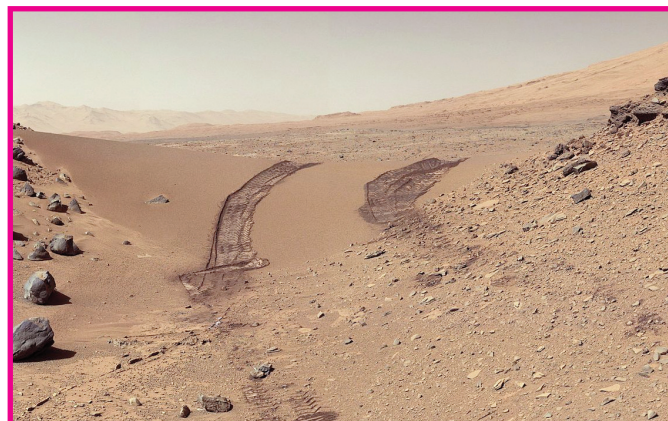
### PROYECTO SOBRE EL PAPEL DEL POLVO Y LAS NUBES EN LA ATMÓSFERA MARCIANA

Marte es el planeta al que más misiones espaciales se han dedicado, y todas las imágenes han revelado una cosa: la abundancia de polvo. Siendo Marte el foco de la futura exploración espacial, tanto robótica como humana, es crucial perfeccionar nuestra comprensión de la atmósfera y el clima marcianos, en los que el polvo juega un papel fundamental.

“Aunque el polvo se halla presente en toda la atmósfera marciana, su abundancia y propiedades físicas están poco definidas -apunta Ann Carine Vandaele (BIRA-IASB), investigadora principal de RoadMap-. Y apenas se está comenzando a abordar el impacto del polvo en la composición, estructura y dinámica de la atmósfera; el conocimiento de las características del polvo y las nubes de hielo resulta fundamental para la interpretación de las observaciones de teledetección, tanto en el infrarrojo como en el ultravioleta”.

### UN ENFOQUE MULTIDISCIPLINAR

RoadMap, un proyecto europeo del



programa Horizonte 2020, busca resolver estas incógnitas mediante la colaboración de expertos de diferentes países en los campos específicos necesarios para resolver el rompecabezas del polvo marciano.

El problema se analizará desde tres enfoques principales: por un lado, expertos en trabajo de laboratorio crearán y definirán un nuevo análogo del polvo marciano, y estudiarán en la tierra las propiedades ópticas y dinámicas de su “gemelo” terrestre. Por otro, se recurrirá a la experiencia de investigadores involucrados en misiones espaciales a Marte, que conocen las complejidades y el potencial de sus instrumentos, así como el conocimiento que se ha obtenido y el que se puede obtener

del planeta mismo. Igualmente, especialistas en el desarrollo de modelos numéricos, como los modelos de circulación global (GCM), aportarán su experiencia para incorporar los datos experimentales en sus modelos estudiando así el efecto del polvo de una forma realista.

La combinación de estos tres enfoques permitirá responder muchas preguntas que han permanecido abiertas sobre Marte: ¿Por qué vemos cantidades considerables de polvo en la atmósfera fuera de las estaciones polvorientas? ¿Cómo comienzan, crecen y terminan las tormentas de polvo, que a veces pueden cubrir todo el planeta? ¿Por qué las tormentas de polvo son tan diferentes en tamaño de un año a otro?

Si hay claras indicaciones de que hubo abundante agua líquida en el pasado y temperaturas más cálidas, ¿a dónde ha ido esa agua? ¿cómo ha escapado de la atmósfera marciana?

RoadMap mejorará nuestra comprensión de la atmósfera marciana y proporcionará una nueva generación de datos de alta precisión, aumentando el retorno científico de las misiones pasadas y actuales a Marte y aportando las claves para futuras misiones.

“Resultados anteriores ya demostraron que la práctica, muy generalizada, de asumir que los granos de polvo son esféricos puede dar lugar a grandes errores en la interpretación de las observaciones -apunta Olga Muñoz, investigadora del IAA-CSIC que participa en el proyecto-. También que ignorar que la luz solar que reemiten las partículas de polvo en todas las direcciones está polarizada puede inducir a errores significativos que, en última instancia, afectarán a los cálculos del clima. Para comprender, por fin, el polvo marciano y su influencia en la atmósfera necesitamos análogos lo más ajustados a la realidad posible, así como un estudio completo de las propiedades de la luz, y este proyecto busca abordar esas cuestiones”.

## ¡Añade una dimensión a tu vida con MEGARA!

No, no es un atractivo anuncio publicitario, es una de las nuevas capacidades del Gran Telescopio de Canarias (GTC), el telescopio óptico más grande del mundo. El instrumento MEGARA (Multi-Espectrógrafo en GTC de Alta Resolución para Astronomía) está disponible a la comunidad astronómica desde el año 2018. En su diseño y construcción han participado el IAA-CSIC, el INAOE (Instituto de Astrofísica, Óptica y Electrónica) mexicano, la Universidad Politécnica de Madrid y la Universidad Complutense de Madrid (UCM), como institución líder del proyecto.

MEGARA es lo que se denomina un espectrógrafo de campo integral, debido a que permite obtener espectros de una zona extensa y bidimensional del cielo. De ahí que a veces se denomine a esta técnica "espectroscopía 2D" o incluso se hable de "astronomía en 3D" (siendo la información en energía la tercera dimensión). La posibilidad de poder obtener información en energía (es decir, color) en dos dimensiones sobre el cielo ha supuesto una revolución, especialmente en las últimas décadas, ya que gran número de objetos celestes (todos menos las estrellas de nuestra propia Galaxia) ocupan dos dimensiones en el cielo: objetos del Sistema Solar, nebulosas planetarias (La Lira, el Ojo de Gato), regiones de formación de estrellas (Nebulosa de Orión), cúmulos abiertos (Las Pléyades) o globulares (El Pesebre) y las galaxias externas (Andrómeda o las Nubes de Magallanes).

Hasta época reciente y desde el comienzo de la espectroscopía, hace algo más de doscientos años con los experimentos del químico inglés W.H. Wollaston, los espectrógrafos solamente habían permitido obtener información a lo largo de una rendija sobre el cielo. Durante las últimas dos déca-

das, la espectroscopía 2D ha venido perfeccionándose, ya sea mejorando en eficiencia, en campo de visión o en su capacidad para resolver la luz blanca en cada vez mayor detalle en energía. En este último aspecto es donde el instrumento MEGARA destaca, con una resolución espectral muy por encima de la gran mayoría de instrumentos de este tipo, especialmente en aquellos instalados en telescopios

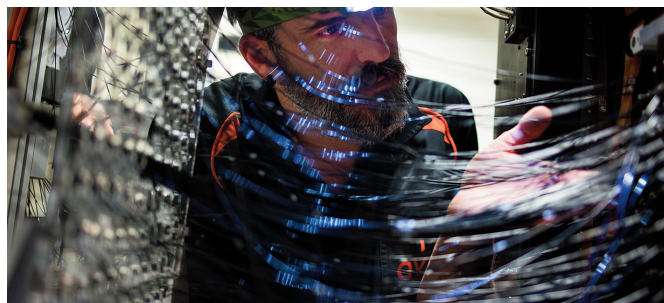
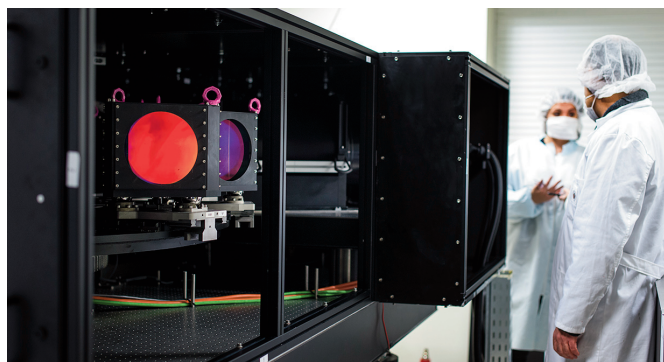
del orden de quince kilómetros por segundo en objetos de muy bajo brillo, algo sin precedentes en espectroscopía 2D.

Otra de las ventajas de MEGARA es su gran versatilidad, algo crítico para un instrumento que no solo sirve para una ciencia en particular, sino que debe satisfacer las necesidades de la comunidad astronómica española en su totalidad y las de los socios internacio-

objetos distribuidos por todo el campo del telescopio. Esta capacidad adicional se denomina espectroscopía multibobjeto.

La alta resolución espectral de MEGARA y su versatilidad han generado una gran demanda por parte de la comunidad, lo que se está traduciendo en un gran número de resultados científicos y publicaciones de impacto en diferentes campos de la astrofísica. Entre estos resultados destacan los estudios de la nebulosa planetaria HuBi 1, el desarrollo de la librería estelar de alta resolución MEGASTAR, o numerosas publicaciones sobre el análisis de las propiedades detalladas de diferentes galaxias cercanas, NGC7025, PHL293B, NGC7469, NGC1569, UGC10215, todas ellas con participación o liderazgo de investigadoras e investigadores del IAA-CSIC.

Pero el campo de la espectroscopía 2D todavía tiene aún muchas fronteras que cruzar. Así, mientras que los instrumentos para hacer imagen (aún sin apenas información sobre la energía de la luz recibida) son capaces de cubrir áreas sobre el cielo del orden o incluso superiores al tamaño de la luna llena, los espectrógrafos 2D de mayor campo de visión actuales apenas llegan a 1/350 veces el tamaño de esta. Con el objetivo de explorar un volumen significativo de universo en 3D como principal objetivo científico, el IAA-CSIC y la UCM colideran, junto con las universidades andaluzas de Granada, Almería y Sevilla, el INAOE y el Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), el desarrollo del instrumento TARSIS para el telescopio de 3.5 metros del Observatorio de Calar Alto (Almería). TARSIS (*Tetra-ARm Super-ifu Spectrograph*) se convertiría, una vez seleccionado y construido, en el espectrógrafo 2D de mayor campo del mundo, cubriendo un área celeste diez veces mayor que la proporcionada por los más potentes del momento.



de gran tamaño. Esta mayor resolución espectral permite analizar en detalle energías muy cercanas, por lo que se pueden detectar características tales como líneas espectrales en un mayor número y medir sus propiedades (posición, intensidad, anchura) con una mayor precisión. Así mismo, haciendo uso del efecto Doppler, esta alta resolución permite determinar pequeños movimientos de los objetos astronómicos respecto al observador. Sin llegar a las precisiones de los espectrógrafos cazaplanetas de rendija, MEGARA es capaz de medir velocidades relativas

nales de GTC (México y la Universidad de Florida). De este modo, MEGARA permite cubrir todo el intervalo óptico del espectro, desde el extremo más azul accesible desde tierra hasta el límite del infrarrojo cercano, con resoluciones e intervalos espectrales adaptables en más de un factor 3x. Más aún, al estar alimentado por fibras ópticas (1300 de ellas, cada una de 46 metros de longitud), MEGARA ofrece también la posibilidad de usar estas fibras de forma dispersa (en vez de agrupadas en un haz compacto en el cielo), para así recoger la luz de un total de 92

## Más dudas que microbios flotando en las nubes de Venus

PILARES

El anuncio del descubrimiento del gas fosfina en las nubes de Venus es interesante desde el punto de vista científico, pero lleva asociada una componente, extremadamente especulativa, sobre la posibilidad que este gas esté asociado a una supuesta vida venusina, tal como argumentaban sus autores.

No es nueva la idea de que podría haber vida microbiana flotando en las nubes de Venus. Desde luego, es el lugar más amable para la vida que podemos encontrar en nuestro vecino planeta. Y, quizás por eso,

emergió de la mano de Carl Sagan hace unos 50 años como lo que es, una especulación, en un momento de la década de los 60 cuando por fin se descifró cómo es ese mundo oculto bajo las opacas nubes. Unos años antes, en 1956, se había conseguido medir la temperatura de su superficie por primera vez, gracias a ese nuevo artilugio tecnológico que se desarrolló en aquella época llamado radiotelescopio. Las elevadas temperaturas obtenidas con estas ondas de radio que atraviesan las nubes de Venus fueron una sorpresa, e hicieron de Venus un mundo tan enigmático que atrajo más atención que su hermano planetario Marte; en esa década, la de los 60, las primeras misiones espaciales se enviaron a Venus. Entre muchos fracasos, por fin la norteamericana *Mariner 2* sobrevoló Venus por primera vez en 1962, confirmando con medidas en microondas unas temperaturas de casi 500 grados en superficie, junto con otra diferencia notable con la Tierra: Venus carece de campo magnético, por lo que su interior profundo, núcleo y manto, debe ser bien diferente al terrestre (¿quizás sólido?). En 1967 la rusa *Venera 4* entró con éxito en la atmósfera de Venus, y aunque se quedó sin baterías antes de llegar a la superficie reveló una exótica composición, de un 95% de dióxido de carbono, y una presión atmosférica

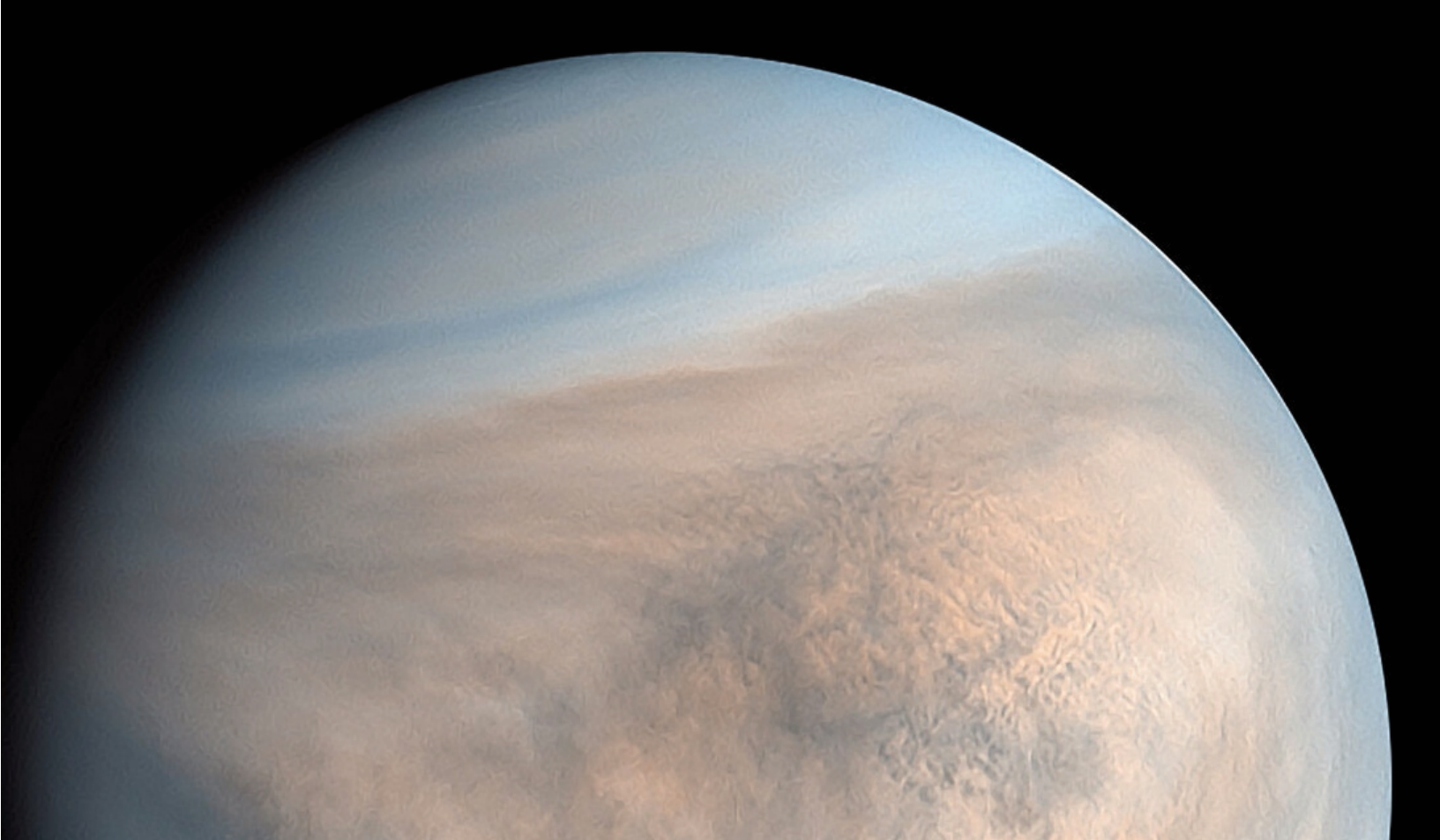
muy elevada, casi cien veces más densa que la atmósfera terrestre. Nuestro hermano planetario no es gemelo, no se parece tanto. En su conjunto, eran y son muy malas noticias para la vida venusina. Pero ¿y sobre las partículas que forman las nubes de Venus? Quizás podría haber un nicho biológico allí, se preguntaron Harold Morowitz y Carl Sagan en 1967.

No son nubes cualesquiera, las que envuelven a Venus. Tras varias misiones espaciales muy exitosas, entre ellas la *Pioneer Venus* con sus cuatro sondas de descenso a finales de los años 70, las sondas *Vega* en 1985, y la europea *Venus Express*, en órbita venusina entre 2005 y 2014, vamos aprendiendo más sobre la estructura y la composición de dichas nubes, y en general de su atmósfera y del clima venusino. Pero con cada paso adelante, como siempre, aparecen nuevos enigmas. Sabemos que las nubes son una densa capa de aerosoles, partículas y grandes moléculas, que se extiende entre unos 48 y 70 kilómetros sobre la superficie, y cuyo componente principal es el ácido sulfúrico. Gotitas de este ácido corrosivo se forman a partir de un gas poco abundante allí, el dióxido de azufre, junto con las escasas cantidades de vapor de agua que hay en la seca atmósfera venusina. Esas gotitas caen y llueve ácido sulfúrico en Venus, pero se evaporan antes de llegar a la superficie. Con ello vuelven a formar dióxido de azufre, que asciende por convección hacia arriba, hasta las nubes, donde condensa de nuevo, iniciando un típico ciclo fotoquímico y dinámico, que no está exento de dudas. Una de ellas se refiere al dióxido de azufre, cuyo origen podría ser volcánico, y que presenta variaciones notables. ¿Estará indicándonos actividad volcánica actual? ¿Nos podrían dar las nubes de Venus pistas sobre la historia geológica del planeta?

Otra duda asociada es sobre el vapor de agua en Venus. Ni el origen de su abundancia actual ni su variación con la altura y, por tanto, su papel a largo plazo en la formación de las nubes, se conocen bien. Parece haber

consenso en que casi toda el agua que tuvo Venus en su temprana infancia, una cantidad similar a los océanos terrestres, se perdió muy pronto por el efecto invernadero desbocado, dejando una densa atmósfera de dióxido de carbono. Puede que la caída de material cometario durante los siguientes cuatro mil millones de años haya dejado ciertas cantidades de vapor de agua en la atmósfera. Un resultado notable de la misión *Magallanes*, en la década de los 90, indicaba que la superficie de Venus es bastante reciente, en vista de la distribución homogénea de los cráteres que se observan. Puede que solo tenga unos quinientos millones de años. Por comparación, la superficie terrestre tiene unos cien millones de años. Mientras en la Tierra el agua es el principal agente erosivo, esto no es así en Venus. Allí la superficie está cubierta de lava enfriada en casi su totalidad. Un gran episodio volcánico, seguramente explosivo y de dimensión global, cubrió de lava todo el planeta y no ha cambiado mucho desde entonces.

La idea de la explosión volcánica global, a escala planetaria, es consistente con un interior planetario muy diferente al terrestre, sin tectónica de placas, y una posible acumulación de calor que podría salir de forma cataclísmica. Estos episodios supervolcánicos son, de nuevo, las malas noticias para la vida en la superficie. Durante el último de ellos, quizás hace quinientos millones de años, se liberaron cantidades grandes de dióxido de azufre y de vapor de agua, los dos gases “padre” de las nubes de ácido sulfúrico actuales. Quizás las nubes son por tanto relativamente recientes, en escalas geológicas. Y biológicas. Una vez más, escenarios evolutivos nada favorables para la biología venusina. Así que, conforme vamos aprendiendo sobre las nubes de Venus, y la evolución del planeta, se desvanece el último nicho posible donde poner los microbios venusinos. Las nubes se revelan hoy como un mundo ácido, corrosivo e inhóspito para la posible existencia de vida.



# INCERTIDUMBRES

Eso no le quita interés y misterio al manto de nubes de Afrodita. Entre los numerosos desafíos que las nubes venusinas nos plantean, merece la pena recordar algunos tan básicos como su color. Su tonalidad amarillenta es una observación notable que sigue sin explicación convincente. Sabemos, tras las misiones *Venera*, que las nubes observadas en azul-violeta y ultravioleta presentan una reflectividad muy baja. Debe haber algún compuesto que absorbe fuertemente en el ultravioleta y que además es muy dinámico, pues esas manchas ultravioleta cambian mucho espacial y temporalmente, según caracterizó bien la cámara VMC de la misión europea *Venus Express*. Ni siquiera se sabe si será una sustancia gaseosa o algún tipo de polvo mineral. Se han propuesto especies de azufre puro, derivadas del dióxido de azufre, pero esto solo parece ser posible en la zona más baja y caliente de las nubes, mientras que las marcas ultravioleta se observan en la zona superior de las nubes. También se ha propuesto cloruro férrico, un compuesto con hierro que provendría de la erosión de posibles rocas con minerales de hierro en la superficie de Venus. Este compuesto estaría en disolución en las gotitas de ácido sulfúrico, aunque no hay evidencias claras de que sea así. Otras especies exóticas con capacidad de absorción en el cercano ultravioleta ten-

drían que estar en abundancias mucho mayores de lo que los modelos de equilibrio químico permiten.

Y hablemos de estos modelos de la química atmosférica, una herramienta interpretativa muy valiosa y que además mide el grado de conocimiento cuantitativo, preciso, que hemos alcanzado. Los modelos químicos actuales son bastante elaborados, y hacen predicciones de muchas moléculas que no han sido detectadas todavía. Aquí es donde el descubrimiento de fosfina en las nubes de Venus es muy interesante. Se ha obtenido con una herramienta observacional muy potente, ALMA, una red de sesenta y seis radiotelescopios situados en el desierto de Atacama en Chile e inaugurada en 2013, y con la que se puede obtener una resolución espacial y una sensibilidad sin igual hasta la fecha en ondas de radio.

En sí, el que haya fosfina en la atmósfera de Venus no es tan sorprendente como indican los autores de ese trabajo, teniendo en cuenta la riqueza química en las nubes de Venus y nuestro conocimiento incompleto de la misma. Y el que estos autores no hayan dado con una explicación convincente a su presencia en Venus es aún menos sorprendente, desde la modestia científica. Las abundancias encontradas son muy bajas. Los autores de ese trabajo han especulado con posibles fuentes de fosfina mientras su

análisis de los datos parece preliminar, como ellos admitían y otros artículos han señalado. En particular, en vez de fosfina la señal detectada podría deberse al dióxido de azufre antes mencionado. Pero, sin duda, este trabajo estimulará la revisión de los modelos fotoquímicos en los próximos años, como ellos mismos apuntan. Esta molécula puede ser una de las numerosas contribuciones a enriquecer nuestro conocimiento de la química atmosférica en Venus, y sin duda que no será la única que ALMA aportará a las ciencias planetarias del Sistema Solar en los próximos años.

Otra dirección en la que avanzar de modo paralelo para desentrañar la naturaleza de las nubes sería una misión espacial dedicada a Venus, con instrumentación actual y precisa que navegue las propias nubes, nubes que no han sido visitadas *in situ* desde las sondas *Vega* hace más de cuarenta años. Quizás podrían utilizarse drones dirigidos desde Tierra que analizarían muestras de las nubes a varias alturas. Parafraseando el título del cuadro del pintor romántico alemán Caspar D. Friedrich, *El caminante sobre el mar de nubes*, preveo que el caminante que flote algún día no muy lejano sobre las nubes de Venus no sean microbios inexistentes sino nosotros mismos, contemplando de cerca con una flotilla de ágiles drones la belleza de las nubes de Venus, y resolviendo su misteriosa química, para entender mejor la historia evolutiva de dicho planeta y la de su hermano terrestre.

## AGENDA



### ■ ■ ■ CONFERENCIAS DE DIVULGACIÓN EN EL IAA CICLO LUCAS LARA

Sesiones de divulgación que se celebran, cada último jueves de mes, en el Instituto de Astrofísica de Andalucía. Pueden seguirse por streaming a través de: [www.youtube.com/iaaudc](http://www.youtube.com/iaaudc)  
Todas las sesiones están disponibles en la web del IAA.



[http://www.iaa.es/lucas\\_lara](http://www.iaa.es/lucas_lara)

## DESTACADOS



### ■ ■ ■ MIRJANA POVIC, PREMIO JOCELYN BELL BURNELL INSPIRATION MEDAL DE LA EAS

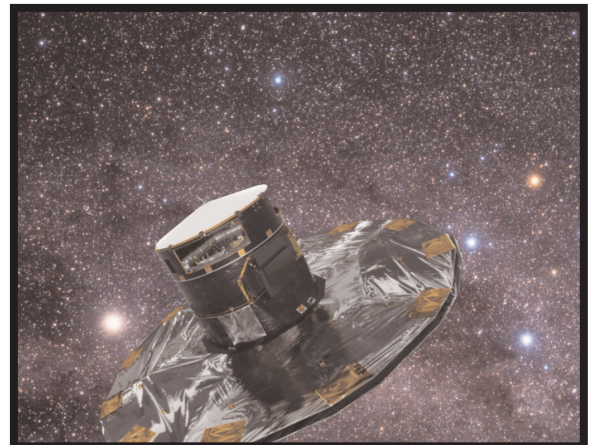
La Sociedad Astronómica Europea (EAS) ha hecho pública su lista de premiados 2021. Entre ellos, Mirjana Pović, que trabaja en el *Ethiopian Space Science and Technology Institute* y es doctora vinculada del Instituto de Astrofísica de Andalucía, ha sido galardonada con la *Jocelyn Bell Burnell Inspiration Medal*, un premio que se concede este año por primera vez. El jurado ha destacado “su trabajo en el desarrollo de la astronomía, la ciencia y la educación como una ruta para salir de la pobreza y mejorar la calidad de vida de los jóvenes en África”.

“La astronomía una capacidad impresionante para contribuir al desarrollo de la educación, la ciencia, la innovación y la tecnología”, señala la investigadora, que ha participado de forma activa en los primeros desarrollos de las ciencias del espacio en Etiopía, Ruanda, Uganda, Tanzania, Kenia, y Ghana, además de Sudáfrica.



### ■ ■ ■ EXPOSICIÓN VIRTUAL “MIL MILLONES DE OJOS PARA MIL MILLONES DE SOLES”

Esta exposición muestra diferentes aspectos de la misión GAIA (ESA), que tiene como objetivo la medida de las posiciones, distancias y movimientos de mil millones de estrellas para desgranar la historia de la evolución de nuestra Galaxia, desde sus orígenes hasta nuestros días. Fundación Descubre difunde una versión actualizada de la muestra, en colaboración con el Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC), la Universidad de Barcelona (UB), el Instituto de Ciencias del Cosmos de la Universidad de Barcelona (ICCUB), el Instituto de Estudios de Espaciales de Cataluña (IEEC) y el Ministerio de Ciencia e Innovación de España (MINECO). Se trata de una versión adaptada de la exposición original diseñada y realizada por la UB, el ICCUB, el IEEC, y el MINECO.



<https://bit.ly/2MHzJc7>

### ■ ■ ■ EL RADIOSCOPIO

El Radioscopio es un programa de divulgación científica realizado y producido desde Canal Sur Radio en colaboración con el Instituto de Astrofísica de Andalucía. Presentado y dirigido por Susana Escudero (RTVA) y Emilio J. García (IAA), este programa aborda la divulgación de la ciencia con humor y desde una perspectiva original y rigurosa.

[radioscopio.iaa.es](http://radioscopio.iaa.es)