

IAA

71

OCTUBRE DE 2023
revista.iaa.es

Información y actualidad astronómica

Revista de divulgación del Instituto de Astrofísica de Andalucía

Misión PLATO



Impresión artística de un sistema
exoplanetario (ESA).

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

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

SUMARIO

Volver a escuchar las estrellas. Misión PLATO ...	3
Observatorio astronómico de Calar Alto: cincuenta años mirando al cielo ...	8
Deconstrucción. El corazón de las tinieblas ...	12
El Moby Dick de ... Fran Pozuelos (IAA-CSIC) ...	14
Historias ... Los zoos humanos ...	16
Actualidad ...	18
Pilares e Incertidumbres ... Mínimo de Maunder y posibles implicaciones climáticas ...	22



Vía láctea al Este de la Puebla de Don Fabrique, cerca del límite con Murcia. Crédito: Máximo Bustamante-Calabria.

El cielo del Geoparque de Granada, amenazado por la contaminación lumínica

La Oficina de Calidad del Cielo (OCC) del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) ha finalizado un estudio sobre la calidad del cielo nocturno del Geoparque de Granada, que muestra que se ha producido un importante aumento de la contaminación lumínica en la región, debido tanto a infraestructuras privadas como a alumbrado público. El trabajo indica, no obstante, que el Geoparque sigue manteniendo un alto porcentaje de su superficie con

una calidad del cielo óptima, y destaca la importancia de revertir la tendencia a aumentar la iluminación nocturna para preservar el cielo oscuro, que constituye un recurso científico, cultural y turístico.

El trabajo se ha realizado por encargo de la Diputación Provincial de Granada, institución en la que recae la presidencia y la secretaría técnica del Comité de Coordinación del Geoparque. Gracias a él, la Diputación

tiene la posibilidad de solicitar las certificaciones de calidad de cielo nocturno para aquellas zonas donde se cumplan los requisitos que exigen las entidades que los otorgan, y de esta manera garantizar el cumplimiento de una serie de normas para la protección del cielo contra la amenaza de la contaminación lumínica.

“La petición de estos sellos de calidad se debe a la necesidad de preservar el cielo nocturno como parte del patrimo-

nio natural de esta zona, y de las posibilidades de desarrollo asociadas al astroturismo y a la actividad científica en el entorno rural. Con este estudio, la Oficina proporciona a la Diputación y a los ayuntamientos del Geoparque una valoración del impacto de su alumbrado exterior, para que les sirva de ayuda a la toma de decisiones para disminuir de forma real la contaminación lumínica”, indica Susana Martín-Ruiz, investigadora del IAA-CSIC que encabeza el estudio.

<https://www.iaa.csic.es/noticias>

MISIÓN PLATO

Volver a escuchar a las estrellas

DE SOLEDADES E INTENTOS DE COMUNICACIÓN ENTRE HUMANOS Y ESTRELLAS

Sebastiano de Franciscis y Javier Pascual Granado, grupo de variabilidad estelar, departamento de física estelar IAA-CSIC

- LAS ESTRELLAS DE BAJA MASA COMO LAS DE TIPO SOLAR SON DE ESPECIAL INTERÉS PORQUE A TRAVÉS DE SU ESTUDIO y de sus sistemas planetarios podemos entender

la singularidad de nuestro propio sistema en términos físicos, biológicos y geológicos, y porque son las que tienen un mayor potencial para estudiar la habitabilidad con la instrumentación actual. Entonces PLATO será un gran aparato de veinticuatro telescopios, orbitando en el punto de Lagrange L2 alrededor del Sol, para detectar exoplanetas habitables...

-¿Planetas habitables dices? ¿Buscando vida allá fuera de nuestra Tierra? ¿Y para qué, Giulia? ¿Para qué?

- Bueno Aldo, eso conlleva grandes retos: imagínate si encontramos otros seres inteligentes en algún exoplaneta, lo que nos podremos contar...

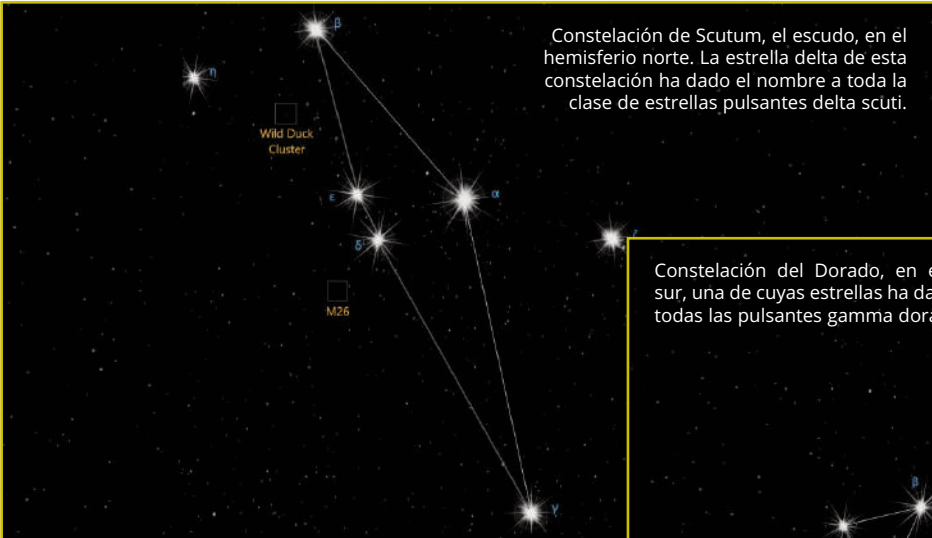
- Alto, para, para... tú ya sabes que yo insisto desde hace tiempo en la idea de que el individuo está solo. Ya que, por más que se esfuerce, no consigue hacer

participar el otro de lo que siente. Hay una separación intrínseca en el humano, y la situación cotidiana que hemos vivido hace poco, pandemia y confinamiento, y la que estamos viviendo ahora, la de un mundo de comunicaciones hipertróficas y autorreferenciales, parece confirmar esta separación como condición de vida*. ¿Y tú crees que nos podremos comunicar con seres de otros planetas?

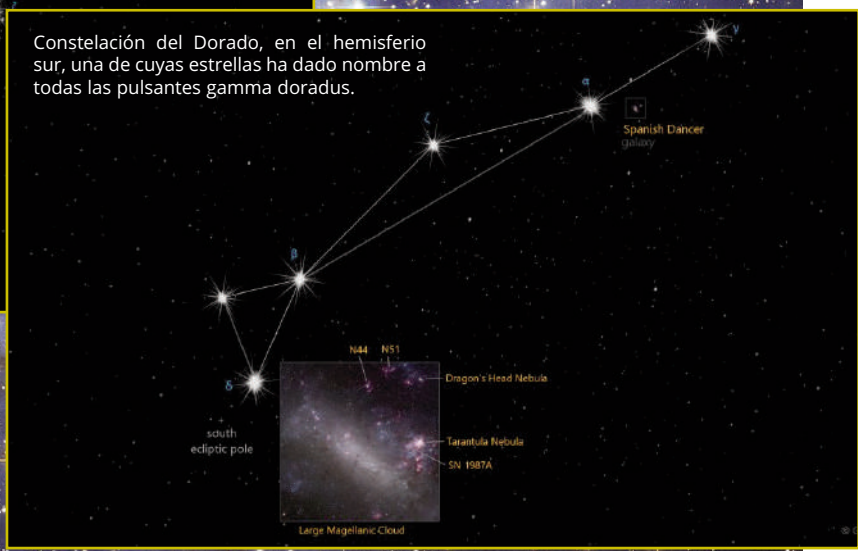
- Pensaré en eso que me dices, pero también hay retos científicos de física más fundamental, también vamos a estudiar las pulsaciones de estrellas con técnicas de astrosimología.

- Eso me parece curioso e intrigante: ¿podéis detectar terremotos en otras estrellas? ¡asombroso!

- No exactamente, se trata de pulsaciones y ondas en temperatura y presión, y



Constelación de Scutum, el escudo, en el hemisferio norte. La estrella delta de esta constelación ha dado el nombre a toda la clase de estrellas pulsantes delta scuti.



Constelación del Dorado, en el hemisferio sur, una de cuyas estrellas ha dado nombre a todas las pulsantes gamma doradus.

* Librementemente inspirado en una de las últimas entrevistas de Aldo Masullo (Avellino 1923 - Napoli 2020), filósofo y político Italiano.

por lo tanto en luminosidad. Lo que podemos observar es la variación de luminosidad en el tiempo, lo que se llamaría la “curva de luz” de una estrella variable.

La evolución de una estrella a lo largo de su vida puede dar lugar a cambios muy drásticos en la estructura interna, de manera que distintos mecanismos de pulsación pueden tener lugar según la edad de la estrella. Así, el estudio de la pulsación estelar, es decir, la astrosismología, permite obtener información sobre el estado evolutivo de las estrellas y sondear su interior para conocer más sobre sus estructuras internas y sus propiedades físicas y químicas.

- ¿Información de qué tipo?

- Por ejemplo, recientemente un logro significativo ha sido el descubrimiento de patrones en las frecuencias de pulsación de estrellas de clase Delta Scuti, ya que permite obtener propiedades básicas como la densidad media de estas estrellas. Este patrón de pulsación es comúnmente estudiado en estrellas que pulsan como nuestro Sol. Sin embargo, las estrellas Delta Scuti tienen más masa y sus frecuencias de pulsación son muy distintas a las de nuestra estrella. El descubrimiento de este patrón en este tipo de estrellas permite entender las frecuencias que observamos, un objetivo perseguido desde los años 90.

- ¿Y cómo conocemos esa densidad

media? ¿Habrá una matemática muy potente, muy difícil?

- Tampoco tanto, resulta que la densidad media de la estrella escala, es decir, es “algo” proporcional, al cuadrado de la diferencia entre las frecuencias de oscilación ν de dos modos de vibración consecutivos,

$$\bar{\rho} \propto \Delta\nu^2$$

esa diferencia se llama la gran separación:

$$\Delta\nu = \nu_{n,l} - \nu_{n-1,l}$$

Este tipo de estrellas en secuencia principal, o la fase en que pasan la mayor parte de su vida transformando hidrógeno (H) en helio (He) en el núcleo mediante reacciones nucleares, presentan unas características muy peculiares: algunas pulsan y otras no; algunas pulsan con periodos cortos, otras con periodos largos y algunas con ambos; la mayoría rota rápidamente.

Más en general, las estrellas de masa intermedia, con entre 1.2 y 2.5 masas solares como son las pulsantes de clase Delta Scuti y Gamma Doradus, se consideran un laboratorio ideal para estudiar distintos fenómenos. Todo se debe a que,

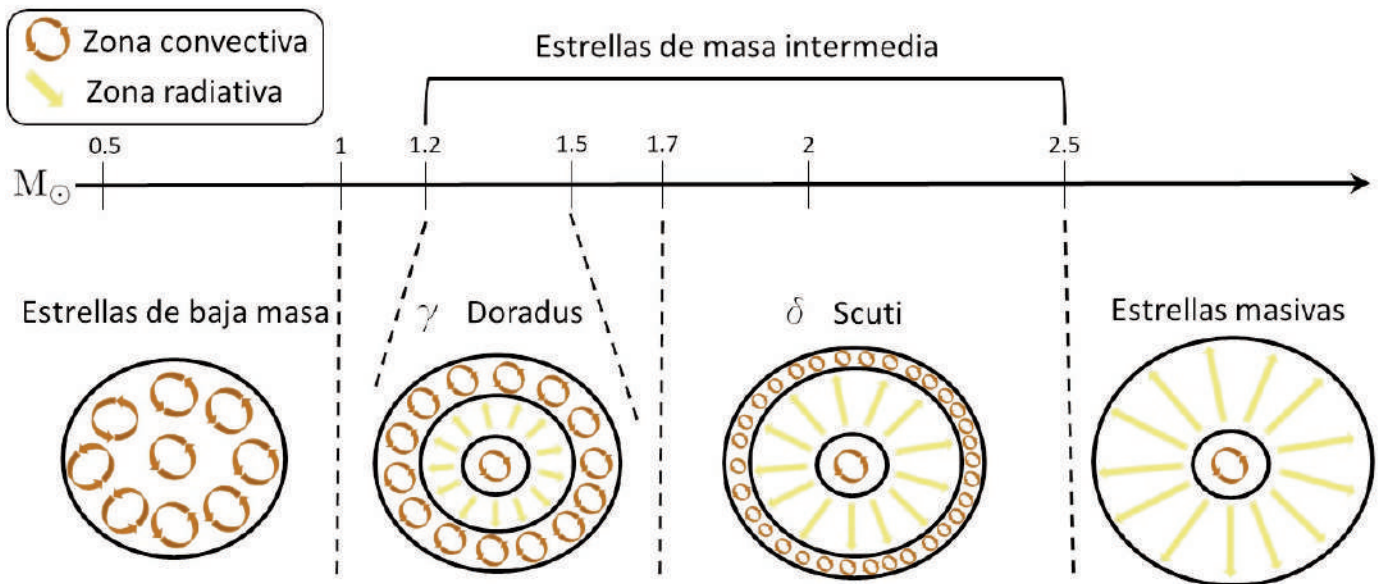
entre este rango de masas, la estructura interna de estas estrellas se encuentra en una región de transición entre las estrellas de tipo solar, caracterizadas por una gruesa capa exterior convectiva, y las estrellas masivas, más calientes, que carecen de capa convectiva (imagen inferior).

- La palabra convección tiene algo que ver con el calor, ¿cierto?

- Eso es, la convección es el mismo proceso que se ve en una olla hirviendo y que tiene lugar en algunas capas de la estructura estelar: se van formando corrientes ascendentes y descendentes de materia (en el caso de la olla es agua, en el caso estelar es plasma), en formas de celdas, las cuales transportan a la vez materia y energía térmica.

- Entonces se puede estudiar la convección, ¿y qué más?

- La convección conlleva otros fenómenos, aún pocos claros, que hay que estudiar, como la mezcla de los elementos. Por otra parte, en el caso del estudio del campo magnético generado por las estrellas, la capa convectiva de estas estrellas actúa como detector, es un “chivato”, ya que su mezcla turbulenta interactuando con el campo genera fenómenos observables y medibles como manchas y *flares* (una liberación súbita e intensa de radiación electromagnética). Hay más propiedades aún: las estrellas Delta Scuti y Gamma Doradus se sitúan, en cuanto a rotación, en una región de cambio



abrupto entre altas y bajas velocidades de rotación (figura derecha abajo), y presentan un buen número de modos de oscilación y de líneas espectrales, necesario para determinar de manera precisa su rotación.

En pocas palabras: estas estrellas tienen un buen número de parámetros físicos mensurables como, además de los ya mencionados, la temperatura efectiva, la gravedad superficial, la masa y el radio. Finalmente, podemos determinar mediante astrosismología la edad estelar, una de las cuestiones clave en astrofísica. Obtener edades estelares con precisión y exactitud es crucial en distintas líneas de investigación: desde el estudio de la formación y evolución de sistemas planetarios hasta el estudio de la formación y evolución de la Vía Láctea. En ambos casos, un objetivo de la misión es alcanzar sobre estas últimas una incertidumbre de menos del 10% para discriminar entre modelos.

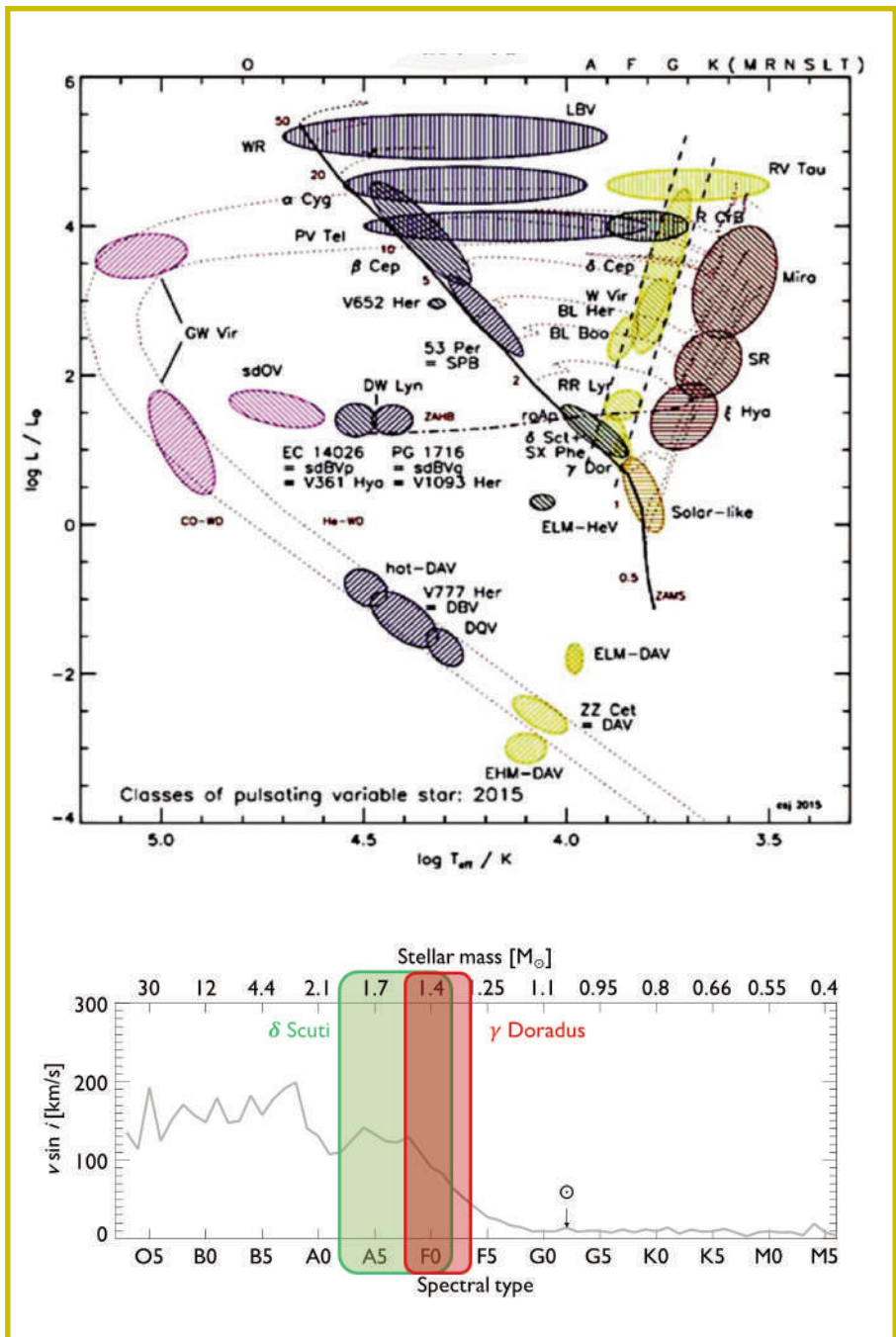
- Me hablas de modelos, pero ¿a qué te refieres exactamente?

- Quiero decir un modelo matemático, formado por una serie de ecuaciones, y sus parámetros, basadas en la física básica de la dinámica estelar (que a su vez se basa en mecánica de los fluidos y teoría de las reacciones en física nuclear, el cual, aun con muchas aproximaciones, puede darnos información sobre las propiedades estelares en función de sus frecuencias de oscilación. Pero, para poder bien contrastar la validez de un modelo, necesitamos compararlo con datos muy precisos.

El modelado habitual implica códigos de evolución estelar y de oscilación de una dimensión (1D), lo que quiere decir que todo tiene simetría esférica. El grupo GARANAT de la Universidad de Granada (UGR), con el que el IAA colabora, ha desarrollado un código de oscilación 1D que tiene un tratamiento perturbativo de la rotación, llamado FILOU, y trabaja con modelos y códigos de oscilación 2D, ESTER y TOP, que tienen en cuenta el aplastamiento rotacional debido a la fuerza centrífuga. ¿Las estrellas rotantes no son pelotas de fútbol, sino balones de rugby!

Los modelos no siempre coinciden con las observaciones y estas diferencias se han ido acentuando con el tiempo conforme aumentaba el número de datos ultraprecisos disponibles.

Por ejemplo, existen zonas del diagrama de Hertzsprung-Russell (HR) donde aún no se han detectado estrellas pulsantes: los modelos de las estrellas más frías del diagrama



Arriba: Diagrama HR mostrando la localización aproximada de las clases de estrellas pulsantes conocidas en 2015. El relleno representa modos-p excitados por opacidad (\\), modos-g (///), modos extraños (| | |) y modos excitados acústicamente (=). Se muestran trazas evolutivas para modelos de estrellas de distintas masas en unidades de masa solar. Crédito: De Pollard et al. 2015, Proc. IAU GA.

Debajo: Distribución de la velocidad de rotación proyectada media de las estrellas, $v \sin i$, en función de su tipo espectral; las estrellas de clase las estrellas Delta Scuti y Gamma Doradus se encuentran en la región de cambio entre altas y bajas velocidades de rotación. Figura adaptada por Giovanni Mirouh de Royer, F.: On the Rotation of A-Type Stars. Lect. Notes Phys. 765, 207-230 (2009)

HR, estrellas de baja masa (de tipo K7), predicen la excitación del modo fundamental radial durante la secuencia principal, y sin embargo estas no han sido detectadas aun ni siquiera con los datos más precisos hasta la fecha.

- Entonces, según lo que entiendo, ¿tampoco habrá muchas estrellas pulsantes?

- No, es al revés. Los tipos de estrellas pul-

santes conocidas han aumentado considerablemente durante las últimas décadas. Con el descubrimiento de más y más estrellas pulsantes poblando el diagrama HR, así como nuevos mecanismos de pulsación, la tendencia en el campo de la astrosismología ha sido pensar que todas las estrellas en algún momento de su vida presentan oscilaciones.

– Recapitulando, hay muchas estrellas que intentan contarnos algo de su vida. Me estás hablando de oscilaciones y de frecuencias: ¿tiene eso algo que ver con los sonidos, con la música?

– En cierta forma sí. Una estrella pulsante es como un instrumento musical que vibra en tres dimensiones. Cuando con la escucha reconocemos los distintos instrumentos musicales por sus timbres, estamos haciendo con nuestro oído inferencia sobre las distintas características de aquellos instrumentos: material, dimensión, elemento vibrante. En astrosismología tratamos de hacer algo parecido sacando el espectro de frecuencias de las curvas de luz. Pero cuidado, estamos trabajando con oscilaciones de intensidad lumínica, no con sonidos. De hecho, si intentamos reproducir las curvas de luz como sonidos mediante técnicas de sonificación, o representación de datos en forma de sonidos, lo más probable es que escuchemos unos horribles estruendos, muy poco agradables al oído humano.

– ¿Como si fueran petardos?

– Puede ser, ¿estás pensando en las fallas de Valencia?

– Más bien en la Nochevieja y en las fiestas de barrio de mi querida Nápoles. Y en *Zi' Nicola*, un personaje de una obra teatral*.

Zi' Nicola "Šparavieri" (disparaveros en napolitano), desilusionado con la humanidad y sus acontecimientos, ha renunciado a hablar prefiriendo expresarse con un código hecho de explosiones de petardos, triquitraques y buscapiés. Eligió así alienarse de las mezquindades de un mundo que había dejado de escucharlo.

– Bien Aldo, ahí está el punto: estamos tratando de volver a escuchar a las estrellas, sus historias y la del universo entero. Te quiero hablar a fondo del trabajo de la misión PLATO, y de lo que trabajamos los teóricos en el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) aquí, en la misma Granada. Pero para esto tengo que entrar en detalles más técnicos, ¿me lo permites? Es un intento de comunicarme contigo, a pesar de tu firme opinión sobre la soledad humana.

– Y es un buen intento, una buena estrategia. Podemos romper las barreras de la soledad individual, solo comunicando al interlocutor algún elemento nuevo e inesperado. Si me cuentas algo que entiendo perfectamente, tu comunicación es estéril, y yo sigo en la soledad de mis pensamientos. De lo contrario, lo que no podemos aferrar enseguida de una comunicación, es precisamente lo que abre una discusión real, hecha

de preguntas, respuestas y comentarios que rebotan de un lado a otro: así intentamos descifrar mutuamente nuestras frecuencias.

– Ya, y en todo caso, si necesitas alguna definición más, tienes a Wikipedia.

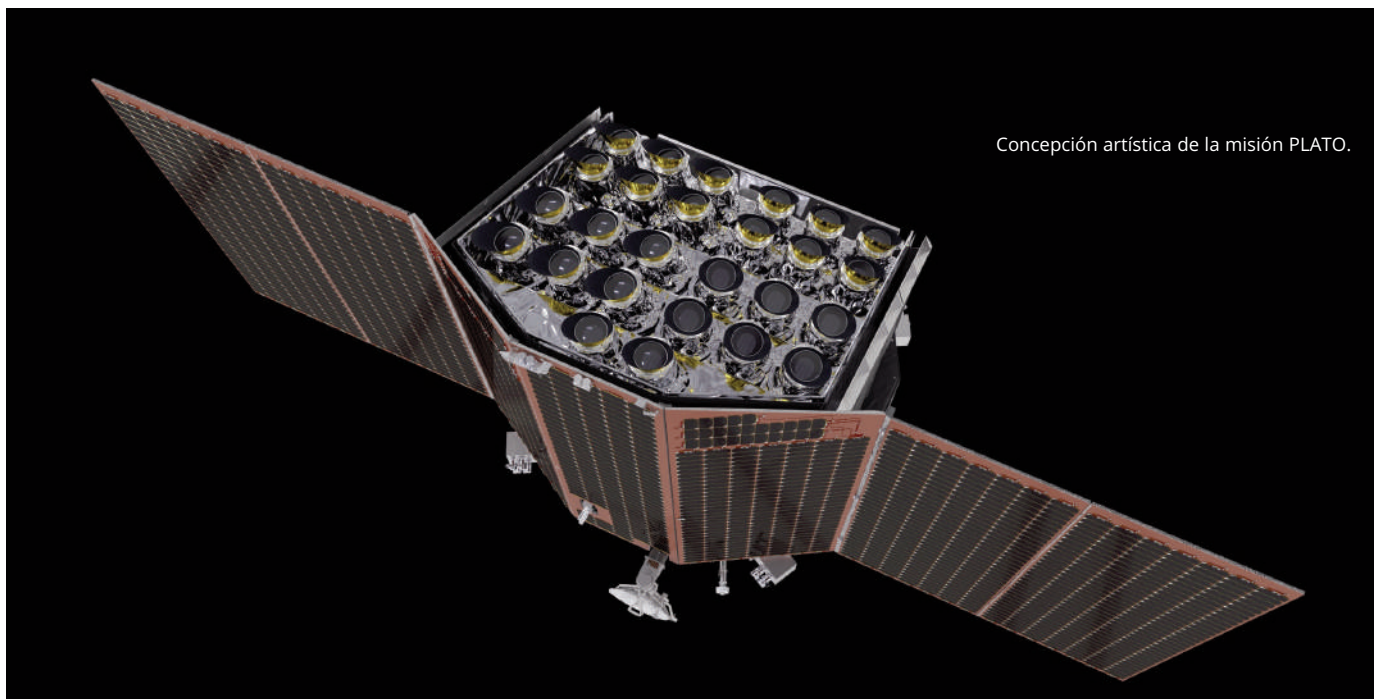
– Eres muy lista, Giulia, y yo un viejo gruñón: critico las nuevas tecnologías de la comunicación, y olvido que también ahí hay herramientas útiles y beneficiosas. En el fondo tenemos suerte de vivir estas décadas.

– A lo nuestro, Aldo. Según el programa principal de la misión PLATO se estudiarán más de trescientas mil estrellas de tipo espectral de F5 a K7 de magnitud menor que 13. En el caso de un conjunto de quince mil enanas (K7) y subgigantes (F5), de magnitud menor que 11, se podrán determinar sus radios con un 5% de precisión, y las masas y edades con un 10%**.

Esta misión será la primera que incluya la astrosismología de un gran número de estrellas brillantes como parte de su estrategia científica para desarrollar modelos estelares de alta precisión y caracterizar sistemas planetarios extrasolares.

– ¿Qué problemas de dinámica estelar podrán resolver entonces estos nuevos datos?

– Todavía se desconoce la causa de los ciclos magnéticos, cómo modelar de forma



Concepción artística de la misión PLATO.

* *"Le voci di dentro"* (Voces del interior) de Eduardo de Filippo, actor, dramaturgo, director y humorista italiano, uno de los mayores hombres de teatro del siglo XX. <http://www.madrid.org/fo/2013-2014/es/fichas/le-voci-di-dentro.html>

** Cuanto más luminoso es un objeto, menor es el valor numérico de su magnitud absoluta. Una diferencia de cinco magnitudes entre las magnitudes absolutas de dos objetos corresponde a una relación de cien en sus luminosidades, y una diferencia de n magnitudes en magnitud absoluta corresponde a una relación de luminosidad de $100n/5$. Por ejemplo, una estrella de magnitud absoluta $M = 3.0$ sería cien veces más luminosa que una estrella de magnitud absoluta $M = 8.0$. El Sol tiene magnitud absoluta $M = 4.83$.

realista la interacción entre convección y pulsación, o cuáles son los mecanismos de selección de la pulsación. La influencia de las abundancias químicas también requiere un ajuste más fino.

– Un trabajo laborioso, complejo e interesante, imagino que vosotros en el IAA os encargáis de unas pocas piezas de todo el programa: ¿En qué trabajáis concretamente?

– Veo que te estas enganando, bien: estamos comunicando y quizás estamos un poco menos solos...

– ¿... con las estrellas?

– Si, cierto, con las estrellas. Y entre nosotros ahora mismo. El grupo de variabilidad estelar del departamento de física estelar del IAA-CSIC está involucrado en la misión espacial PLATO2.0, de la Agencia Espacial Europea (ESA), en una posición de liderazgo. Javier Pascual Granado contribuye en los paquetes de trabajo “*Lightcurve Preparation for Asteroseismology*” y “*Pulsating stars*” y coordina, actualmente, la participación científica del IAA a través del desarrollo de cuatro líneas de investigación:

1. Técnicas innovadoras de análisis de datos aplicadas a la explotación de la nueva generación de instrumentos. Por ejemplo, el compañero Sebastiano de Franciscis está aplicando una herramienta de análisis matemático, basada en la teoría fractal del ruido de fondo, para filtrar en las curvas de luz las oscilaciones armónicas propias de las estrellas pulsantes. Esta herramienta, llamada *Coarse Grained Spectral Analysis* (CGSA), proporciona el porcentaje de señal fractal presente en una serie temporal. Este porcentaje se ha medido en todos los pasos de selección de armónicos del algoritmo de prewhitening SigSpec, para una muestra de estrellas Delta Scuti, Gamma Doradus e híbridas, con resultados coherentes, y podría dar lugar a un criterio de parada del algoritmo SigSpec, acorde a un principio físico, evitando que se inyecten en la señal nuevos componentes armónicos espurios y ficticios.

2. Modelos estelares avanzados. La compañera Mariel Lares Martiz estudia y caracteriza las frecuencias espurias de las HADS (*High Amplitud Delta Scuti*), una clase de Delta Scuti de gran amplitud de oscilación, las cuales son combinaciones de frecuencias propias de las estrellas. Se creía que estas frecuencias espurias no dirían nada nuevo de la estrella, como palabras redundantes y vacías, y sin embargo su trabajo demuestra de que sí: tratando teóricamente las curvas de luz mediante la técnica de expansión de

Volterra, Mariel ha revelado para estas frecuencias unas simples relaciones algebraicas, en amplitud y en fase, que parecen ser universales, un trato común, en todas las HADS. Además de esto, estas mismas relaciones sirven para estimar la rotación, y algunos parámetros físicos como la temperatura efectiva y la gravedad superficial. Su estudio es la base del trabajo doctoral de Miriam Rodríguez Sánchez sobre modelos estelares de oscilación no lineales.

3. Inteligencia Artificial para el procesamiento masivo de datos y aplicaciones novedosas para la creación masiva modelos teóricos de estrellas y planetas. El compañero José Ramón Rodón está colaborando con Mariel Lariz para caracterizar, mediante técnicas de *Machine Learning* y *Deep Learning*, empleando una base de datos filtrada de doscientas estrellas Delta Scuti de gran (HADS, *High Amplitud Delta Scuti*) y pequeña (LADS, *Low Amplitud Delta Scuti*) amplitud, procedentes de las misiones Kepler y TESS. Con esta base de datos ya han podido operar una y clasificación mediante algoritmos no supervisados (*clustering*), así como sacar conclusiones interesantes en términos de caracterización según parámetros físicos. También están entrenando algoritmos de redes neuronales predictivos. El plan de futuro es ampliar la base de datos a veinte mil estrellas, de la misión TESS, y así garantizar mejor precisión y fiabilidad en clasificación y predicciones.

4. Ciencia Abierta. La aplicación de los principios FAIR (*Findability, Accessibility, Interoperability, and Reusability*) es uno de los paradigmas/valores del grupo, en cuanto es cada vez más necesaria conforme el volumen de datos crece de manera exponencial para hacer una verdadera ciencia accesible.

El grupo apuesta definitivamente por la implementación de los principios de Ciencia Abierta (*Open Science*): hacer ciencia de manera transparente, trabajar y obrar para que la ciencia y sus resultados no se queden en el grupo, sino que se deban transmitirse a toda la comunidad. Para esto es preciso publicar en revistas de *open Access*, y que tanto los códigos, como las metodologías y los protocolos empleados, sean claros, comentados y reproducibles al 100%. Por y para la Ciencia Abierta el compromiso del grupo es luchar para que los datos obtenidos de la futura misión PLATO y su procesado sean accesibles a toda la comunidad científica.

Finalmente, en breve se prevé la incorporación al grupo de Elham Ziaali, una investigadora senior iraní especialista en el análisis de series temporales transformadas en redes complejas aplicadas al estudio de estrellas pulsantes.

– Todo lo que me cuentas es asombroso: este afán de hacer una ciencia cada vez más abierta y sincera, todo este esfuerzo colectivo, hecho en equipo, en colaboración, para buscar la manera de entender las estrellas, trabajando con personas procedentes de muy lejos, tejiendo redes de comunicación y comprensión del universo y de la humanidad. Esta noche dormiré, soñaré, viendo la bóveda celeste desde mi ventana, con un poco más de esperanza, para mí, para todos: aún podemos comunicar, o por lo menos intentarlo, para participar con los otros de lo que sentimos y entendemos, y en algunas ocasiones estaremos menos solos. Buenas noches, Giulia.

– Buenas noches, Aldo.

BIBLIOGRAFÍA

Patrones en las frecuencias de pulsación de estrellas de clase δ Scuti: A. García Hernández et al. 2015 ApJL 811 L29.

Código de oscilación 1D FILOU: J.C. Suárez, *FILOU oscillation code. Astrophys Space Sci* 316, 155–161 (2008)

Códigos de oscilación 2D ESTER y TOP: Mirouh G., *Front. Astron. Space Sci.*, 07 October 2022, *Sec. Stellar and Solar Physics*, Volume 9 (2022).

Sonificación y astrofísica: “Sonificación, la sinfonía de las estrellas”, J. Pascual y S. de Franciscis, charla https://www.iaa.csic.es/lucas_lara/sonificacion-sinfonia-estrellas
LA CASA DEL SONIDO, “Sonidos y sonificaciones del espacio”, Con Enrique Pérez Montero y Rubén García Benito, Radio Clásica, <https://www.rtve.es/play/audios/la-casa-del-sonido/casa-del-sonido-sonidos-sonificaciones-del-espacio-04-06-19/5259440/>
Coarse Grained Spectral Analysis (CGSA) y el algoritmo de prewhitening SigSpec: S de Franciscis et al., *MNRAS*, Vol 487, Issue 3, Pages 4457–4463,

Estudio de las frecuencias espurias de las HADS (*High Amplitud Delta Scuti*), expansión de Volterra y clasificación mediante algoritmos no supervisados de clustering: M. Lares-Martiz, *MNRAS*, 2020, 498(1), 1194–1204

M. Lares-Martiz, *Front. Astron. Space Sci.*, 07 November 2022, *Sec. Stellar and Solar Physics*, Volume 9 - 2022.

Transformación de series temporales en redes complejas: E. Ziaali, (2023). *Complex network view for δ Scuti stars*. arXiv preprint.

Observatorio astronómico de Calar Alto: cincuenta años mirando al cielo

UNA MIRADA PANORÁMICA AL MAYOR OBSERVATORIO DE EUROPA CONTINENTAL

Sol Molina (Azimuth, educación y turismo científico S.L.)

ESTE AÑO CUMPLO CINCUENTA AÑOS, Y NUNCA IMAGINÉ LLEGAR A ESTA EDAD TAN BIEN CONSERVADO. ¿A ustedes también les sucede que sienten que tienen menos edad que la que muestra el documento de identidad? Pues yo me siento así, pero en mi caso hay una buena razón, me han cuidado mucho desde mi nacimiento y gracias a eso estoy en la flor de la vida.

Todo comenzó unos años antes del 1973, cuando investigadores del Instituto Max Planck de Astronomía de Alemania se plantearon construir un observatorio astronómico de primer nivel para tomar datos cien-

tíficos. Claro está, una infraestructura de esas características no se puede emplazar en cualquier sitio, y menos en lugares donde el clima suele estar nublado y no se pueden observar las estrellas. Por ello, dicho grupo alemán emprendió la ardua tarea de realizar numerosas mediciones de las condiciones del cielo en diferentes lugares de Europa y el norte de África, y concluyeron que la Sierra de los Filabres en Almería era el sitio idóneo para mi construcción. Ciertamente el sitio natural es inigualable, con ciervos, zorros, aves y jabalíes que me visitan habitualmente y el silencio que lo inunda todo. Y el cielo, ¡guau, es espectacular! Con condiciones para la observación astronómica inigualables, realmente es lo que me enamoró profundamente, tanto es así que paso todas las noches mirando hacia arriba con mis telescopios.

Llegué a este mundo en el 1973, año en el que entró en vigor el acuerdo entre Alemania y España para construirme. Y fue en el año 1975 cuando, gracias a numerosos estudios y grandes esfuerzos técnicos, pudieron inaugurar mi primer telescopio. Este tiene un espejo principal de 1.23 metros de diámetro y por eso lo bautizaron con el nombre de 1.23 metros (vamos, que

toda la creatividad se les había gastado con la construcción de tantos instrumentos novedosos y no les quedó nada para el nombre). Durante los siguientes nueve años fui creciendo y madurando: en 1979 se concluyó la construcción del segundo telescopio en tamaño del observatorio, con 2.2 metros de diámetro, y en 1980 se inauguró la cámara Schmidt, un telescopio con ochenta centímetros de diámetro efectivo. Este instrumento es el más veterano del observatorio, ya que funcionaba desde 1956 en el Observatorio de Hamburgo antes de llegar al Observatorio. Por último, en el año 1984 comenzó a observar el mayor de mis telescopios, el que tiene 3.5 metros de diámetro de espejo principal.

La verdad es que el esfuerzo y dedicación de todas las personas que han trabajado en mi construcción y mejora en todos estos años es difícil de explicar. El resultado es que, a día de hoy, mi querido telescopio de 3.5 metros es el telescopio óptico más grande de toda Europa continental. Y esto no es solo una cuestión de tamaño, sino que se han desarrollado instrumentos específicos para instalar en dicho telescopio que están haciendo grandes descubrimientos científicos, ya les contaré más adelante sobre estos



grandes avances.

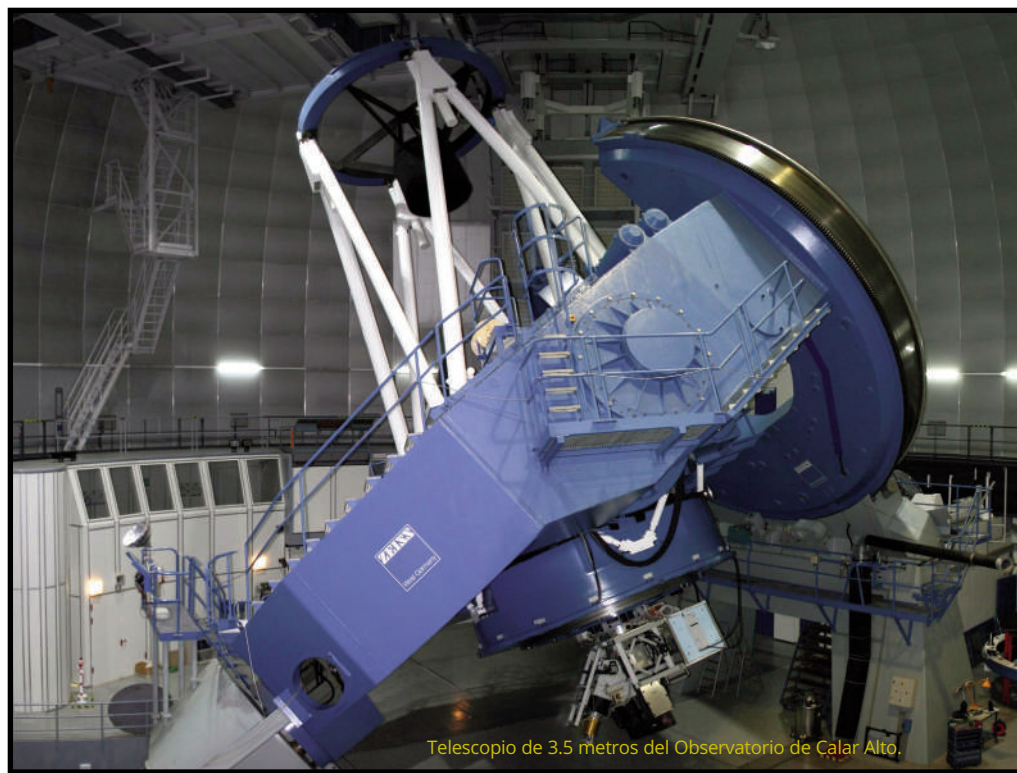
Pero, ¿qué ha pasado desde esa fecha? Bueno, muchas cosas. Desde el año 2004, España tomó más liderazgo y comencé a ser financiado tanto por Alemania como por España. Qué alegría empecé a sentir cuando numerosos estudiantes de doctorado y grupos de investigación de toda España comenzaron a venir a visitarme más asiduamente para tomar datos y realizar nuevos descubrimientos. La verdad, humildad aparte, soy consciente de que contribuí a que la astrofísica en España diera grandes pasos. Y finalmente en 2019 ocurrió un evento importante: me dieron la nacionalidad española. Ahora soy 100% español, y andaluz, por qué no decirlo. Desde el año 2019 me financian el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Junta de Andalucía. Me gustaría ponerlos al día de lo que más me ha fascinado estudiar en toda mi trayectoria. Y empezaré por la primera vez que se observó el impacto de un cometa en un planeta de nuestro Sistema Solar, Júpiter.

IMPACTO DEL COMETA SHOEMAKER-LEVY 9 SOBRE JÚPITER

La historia comienza en el año 1993, cuando se descubrió un cometa que orbitaba alrededor de Júpiter. Esto es un proceso bastante fuera de lo común, ya que los cometas suelen orbitar alrededor del Sol y no en torno a un planeta. En este caso, Júpiter, con su gran masa y gravedad, había capturado a su víctima, el cometa Shoemaker-Levy 9. Este intruso sería devorado por Júpiter, no antes de sufrir un doloroso desmembramiento en fragmentos que fueron impactando en Júpiter a lo largo de varios días. Yo fui el primer observatorio desde Tierra que observó el fenómeno en julio de 1994 y, gracias a lo interesante del proceso, numerosos observatorios también apuntaron sus telescopios hacia Júpiter. Estas observaciones, realizadas con la cámara infrarroja MAGIC en el telescopio de 3.5 metros, permitieron medir por primera vez los vientos de la alta atmósfera de Júpiter, así como su estructura interna. Además, se pudo estudiar la composición química del cometa y estudiar en gran detalle cómo se producen grandes impactos entre objetos del Sistema Solar. Hasta la fecha no se ha repetido una colisión en directo tan espectacular.

EVOLUCIÓN DE GALAXIAS

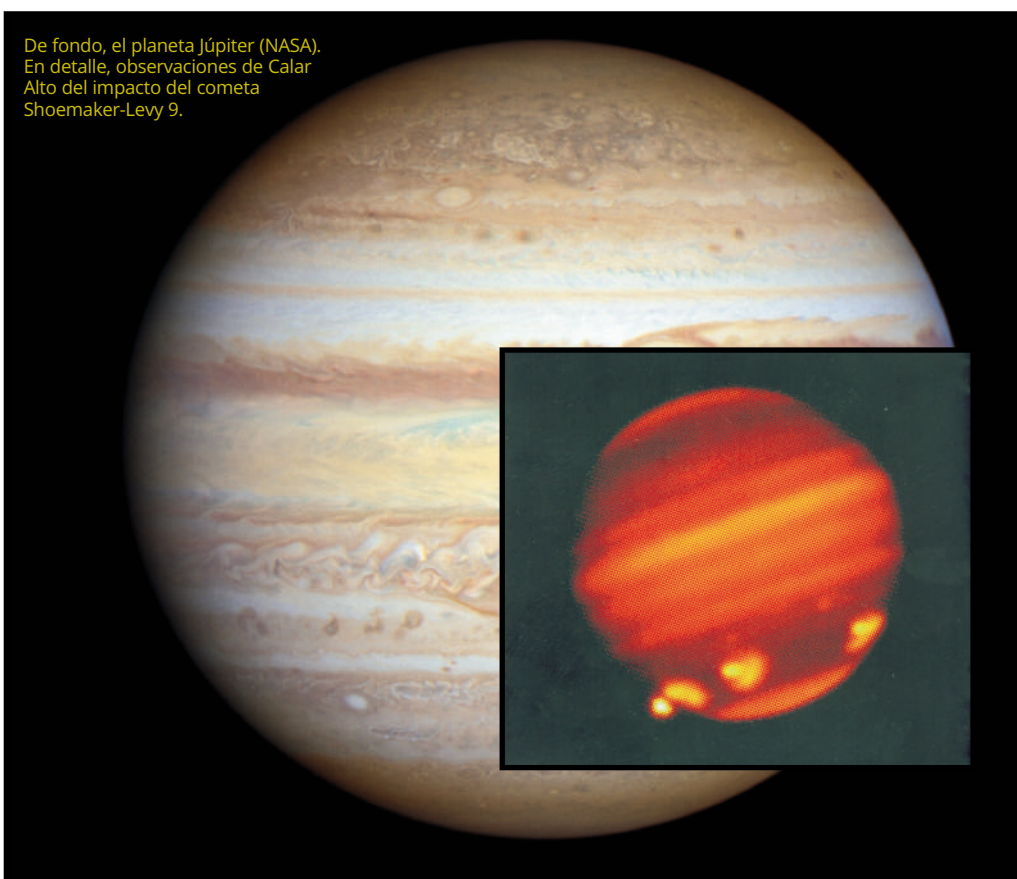
Al llegar a cierta edad uno se pregunta qué ha hecho de su vida y qué va a dejar a la posteridad. La verdad es que desde hace un tiempo me lo vengo preguntando, (también



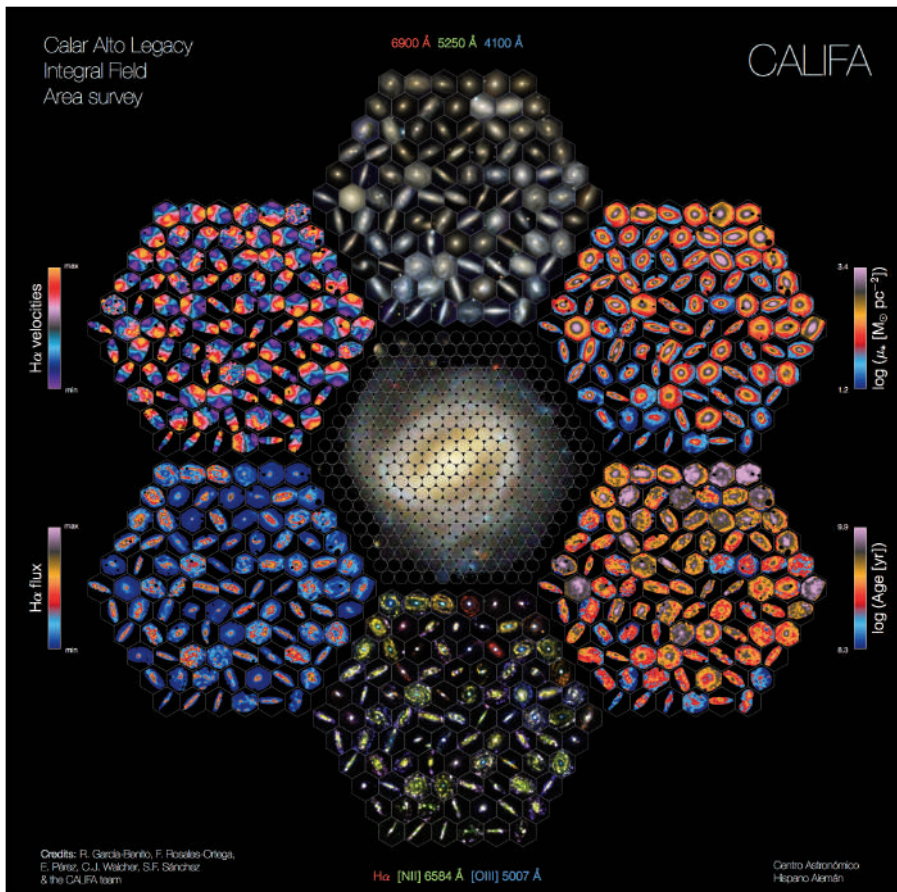
Telescopio de 3.5 metros del Observatorio de Calar Alto.

pasé por la crisis de los 40) y uno de mis fuertes científicos, a los que dedico muchas noches de observación, desde hace ya más de una década, son los programas de legado. Estos programas producen grandes bases de datos, que luego son entregadas a la comunidad científica para resolver problemas fundamentales de la astrofísica actual. Un ejemplo de esto son los programas CADIS, ALHAMBRA, CALIFA, CAVITY, CARMENES LEGACY+ y KOBE. Los pioneros fueron CADIS y ALHAMBRA, que estaban enfocados en la observación de galaxias a grandes distan-

cias. Dado que al observar objetos astronómicos lejanos estamos viendo cómo eran en el pasado, estos programas han permitido obtener un mejor entendimiento de la evolución galáctica desde tiempos muy remotos. Posteriormente, en el año 2010, se dió el puntapié inicial al programa CALIFA, que llegó a observar aproximadamente seiscientas galaxias en el universo local con gran precisión y es, hasta la fecha, el mayor muestreo de este tipo jamás completado. Lo novedoso de estas observaciones reside en que se han combinado técnicas de imagen directa con espectroscopía, y como resul-



De fondo, el planeta Júpiter (NASA). En detalle, observaciones de Calar Alto del impacto del cometa Shoemaker-Levy 9.



MANDALA DE CALIFA. CALIFA permite estudiar las propiedades del gas y de las estrellas, como edad, movimientos, masa o cantidad de metales -elementos más pesados que el hidrógeno y el helio- que presentan. A partir de esos datos, se pueden derivar los trece mil millones de años de historia de cada galaxia y buscar patrones comunes. En la imagen (desde arriba, en sentido horario): imágenes en banda ancha; densidad de masa estelar; edad media de las estrellas; líneas de emisión de diagnóstico; emisión en hidrógeno alfa; cinemática.

tado se ha podido extraer información detallada de cada región de las galaxias. Esta técnica se llama espectroscopía de campo integral y pocos observatorios del mundo tienen el privilegio de contar con instrumentos con estas características, como PMAS. Ya se lo advertí, no todo es cuestión de tener telescopios grandes, sino también de los instrumentos científicos que se construyen y utilizan para analizar la luz proveniente de las estrellas y galaxias.

CALIFA ha sido fundamental para entender cuestiones relacionadas con la dinámica y evolución de las galaxias. Por ejemplo, con los datos de CALIFA se ha medido que el sentido de rotación de una galaxia se ve influido por sus compañeras, incluso las alejadas tres o más millones de años luz. Esto es bastante llamativo y muestra cómo en el universo todo está más relacionado de lo que parece, incluso galaxias separadas millones de años luz de distancia.

Otro resultado asombroso, que se ha podido confirmar de manera más robusta gracias a los datos de CALIFA, es que las galaxias se forman desde dentro hacia afuera, es decir, primero se forman las partes centrales y más tarde, a ritmo más pausado, las regio-

nes externas. Además, también se ha podido estimar que el pico de formación de estrellas en el universo se produjo en épocas muy tempranas, entre tres y cuatro mil millones de años después del Big Bang (hay que tener presente que la edad estimada del universo es de 13.800 millones de años).

Y, como los buenos resultados inspiran nuevos estudios, a día de hoy se está llevando a cabo el primer muestreo completo de galaxias en zonas del universo muy poco pobladas (o vacíos). Un resultado reciente obtenido con este muestreo, llamado CAVITY (*Calar Alto Void Integral-field Treasury survey*) y publicado en la revista Nature, explica que las galaxias en los vacíos cósmicos evolucionan más despacio que las galaxias que se encuentran en regiones más pobladas. Esto está ayudando de forma fundamental a comprender la evolución de las galaxias, tanto en zonas muy pobladas como en los vacíos.

PLANETAS EXTRASOLARES CON CARMENES

Llegamos a lo que hoy en día es una de las investigaciones más punteras que se están haciendo en uno de los campos de la astro-

física con más auge en la actualidad: la búsqueda de planetas extrasolares (planetas fuera del Sistema Solar) con condiciones similares a las terrestres.

La humanidad siempre se ha sentido maravillada por el cielo y lo ha observado tratando de develar sus misterios. Tanto es así, que desde antes del auge de la cultura griega los seres humanos han puesto a sus dioses en el firmamento, lo que nos ha llegado en forma de constelaciones. Estoy seguro de que todas las civilizaciones se han preguntado si serían los únicos habitantes de este vasto universo y, contagiado por su curiosidad, no dejo de observar el cielo tratando de responder a tan grandiosa cuestión. En este sentido el instrumento CARMENES (*Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Échelle Spectrographs*) nos está ayudando a encontrar respuestas, ya que es un proyecto diseñado específicamente para buscar y caracterizar planetas rocosos, de masas similares a la terrestre, orbitando en torno a enanas rojas (son estrellas menos masivas y más frías que nuestro Sol). De este instrumento se están beneficiando los proyectos de legado CARMENES Legacy+ y KOBE, que desde 2021 observan muestras de estrellas (de tipo espectral M y K), para descubrir los planetas que las orbitan.

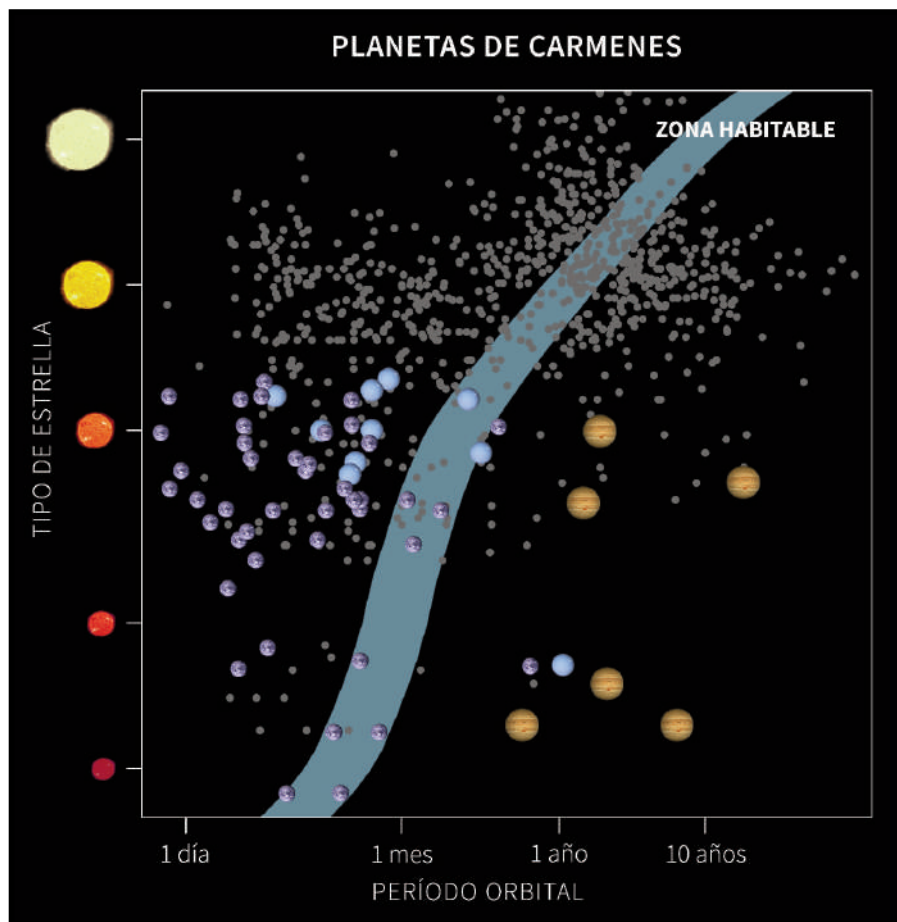
Esto, como se podrán imaginar, no es nada sencillo. Detectar planetas que no producen su propia luz, que son pequeños en comparación con la estrella que orbitan (cabrían un millón de planetas Tierra dentro del Sol) y que se encuentran a varios años luz de distancia del Sistema Solar es una tarea titánica. Pero, gracias a mi querido telescopio de 3.5 metros y a CARMENES, ya se han detectado más de sesenta planetas extrasolares y se han estudiado cientos de ellos. Para hacer nuevos descubrimientos, muchas veces hay que desarrollar tecnologías que antes no existían. En el caso de este instrumento esto ocurrió debido a la necesidad de observar estrellas más pequeñas y frías que el Sol, que emiten una gran cantidad de su luz en longitud de onda infrarroja. Para observar en el infrarrojo, CARMENES tiene que funcionar a una temperatura de 133 grados bajo cero (bastante fresquito, ¿no?). Y además dicha temperatura no puede variar en más de una milésima de grado. Todo esto es muy complejo a nivel tecnológico, y para ello fue necesario desarrollar un novedoso sistema de enfriado que emplea un flujo continuo de nitrógeno a muy baja temperatura.

¿Estamos más cerca de descubrir otro planeta similar a la Tierra viajando por el espa-

cio? Yo diría que sí. A día de hoy, el planeta extrasolar confirmado con mayor similitud a la Tierra se ha estudiado desde Calar Alto, y se llama Teegarden-b. Este planeta posee una masa similar a la terrestre y se estima, por su distancia a la estrella que orbita, que podría tener una temperatura templada, lo cual permitiría que albergara agua líquida en su superficie. De momento no sabemos si este planeta posee atmósfera o agua, pero desde luego es un mundo muy prometedor para seguir realizando estudios. Siempre cabe la posibilidad de que en algún mundo lejano se hayan dado condiciones similares a las terrestres y algún tipo de vida pueda haberse desarrollado allí, seguramente en un futuro cercano podremos estar más cerca de responder a estas preguntas.

Otro descubrimiento apasionante es el planeta Kelt-9b. Se estima que este exoplaneta tiene tres veces la masa de Júpiter, es decir, se trata de un gigante gaseoso, pero difiere mucho de nuestro Júpiter, ya que Kelt-9b se encuentra orbitando a su estrella a una distancia menor que la de Mercurio al Sol. Esto, como podrán imaginarse, produce que en el planeta haga muchísimo calor, unos 4.300 grados, es decir, está más caliente que la superficie de muchas estrellas. Y esto no es todo, porque desde el Observatorio de Calar Alto se ha descubierto que parte de la atmósfera del planeta está siendo arrastrada por su estrella, algo impensable en nuestro Sistema Solar. Sumado a todo esto, gracias a la alta precisión de CARMENES, se ha llegado a detectar oxígeno en la atmósfera de este planeta. Esta es la primera detección de oxígeno en la atmósfera de un planeta fuera del Sistema Solar, lo cual es todo un logro, y abre las puertas a estudios de atmósferas en otros exoplanetas.

Por último, quiero contarles que existen casos en los cuales ya se está estudiando el interior de los exoplanetas. Este es el caso de Gliese 486 b, que fue descubierto en el Observatorio de Calar Alto con CARMENES y luego se ha seguido estudiando con este instrumento y con otros observatorios del mundo. La combinación de todos los datos ha permitido medir con una precisión sin precedentes su masa y su radio, lo que ha permitido modelar su interior y hacer predicciones sólidas sobre la estructura y composición interna de esta supertierra (se le llama así porque tiene 2.8 veces la masa de nuestro planeta). Como podrán ver es tan importante estudiar planetas extrasolares similares a la Tierra como sistemas planetarios muy diferentes al Sistema Solar, ya que todo ese conocimiento nos ayuda de manera crucial a comprender la formación de sistemas planetarios, entre ellos el nuestro.



En la imagen se muestran como puntos grises todos los planetas descubiertos con el mismo método que CARMENES, pero con otros instrumentos. En el período 2016-2020, CARMENES ha descubierto y confirmado 6 planetas 'tipo Júpiter' (con masas más de 50 veces la de la Tierra), 10 'Neptunos' (de 10 a 50 masas terrestres) y 43 Tierras y supertierras (hasta 10 masas terrestres). El eje vertical muestra el tipo de estrella sobre la que los planetas orbitan, desde las enanas rojas más frías y pequeñas hasta estrellas más brillantes y calientes (el Sol correspondería a la segunda desde arriba). El eje horizontal da una idea de la distancia del planeta a la estrella, al mostrar el tiempo que tardan en completar la órbita. Los planetas que se encuentran en la zona habitable (indicada por la franja azul) pueden albergar agua líquida en la superficie. Crédito: Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC)

NUEVOS INSTRUMENTOS

Con tantos resultados científicos y una trayectoria tan extensa, no crean que me duermo en los laureles, puesto que ya me estoy planteando qué descubrir en mis próximos años. Un tema apasionante es la evolución de las galaxias en épocas del universo en las cuales la formación de estrellas era muy superior a la actual. Para estudiar esto, un equipo coliderado desde el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) y la Universidad Complutense de Madrid (UCM), en estrecha colaboración conmigo (a estas alturas creo que ya saben quién les está contando la historia, el propio Observatorio Astronómico de Calar Alto) está construyendo un instrumento llamado TARSIS, con características únicas en el mundo. Este instrumento funcionará en mi telescopio de 3.5 metros y tendrá la capacidad de observar en azul-ultravioleta y en longitudes de onda rojas, es decir, en un rango de energía muy amplio. Se trata

de un espectrógrafo, un instrumento que divide la luz en las diferentes longitudes de onda (o colores) para hacer estudios en profundidad de las galaxias que observe. La particularidad es que utilizará la técnica de espectroscopía de campo integral, que consiste en obtener información detallada de la composición química, la distancia, la dinámica y muchos aspectos más de cada zona particular del campo observado. Esto se combina con un campo de visión muy extenso, de casi 3x3 minutos de arco, lo cual permitirá observar cúmulos de galaxias y hacer estudios sin precedentes.

Llegados a este punto, les agradezco que se hayan interesado por mi historia, espero que les haya parecido interesante, y que puedan poner en valor todo el esfuerzo y desarrollo científico que se realiza desde una Infraestructura Científica y Técnica Singular (ICTS) como es el Observatorio astronómico de Calar Alto.


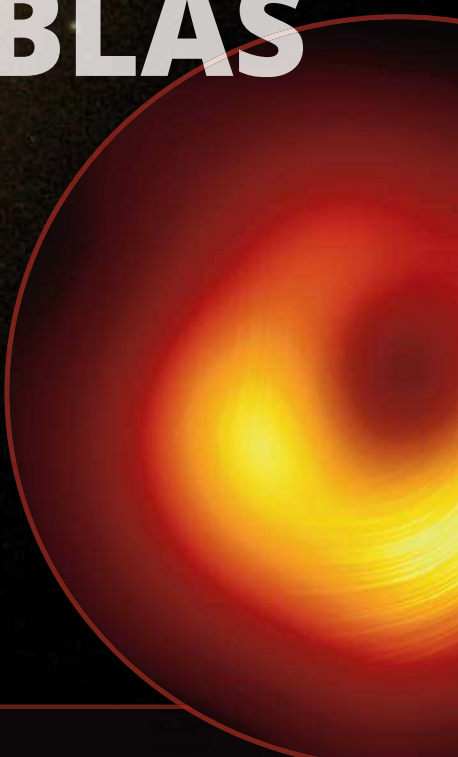
EL CORAZÓN DE LAS TINIEBLAS

LA GALAXIA M87
SALTÓ A LOS TITULARES
CUANDO EL TELESCOPIO
DEL HORIZONTE DE SUCESOS
(EHT) OBTUVO UNA IMAGEN DEL
AGUJERO NEGRO SUPERMASIVO
QUE ALBERGA SU NÚCLEO. MUCHO
MÁS MASIVA QUE NUESTRA VÍA LÁCTEA,
DE LAS REGIONES CENTRALES DE M87
EMERGE UN CHORRO DE MATERIAL QUE SE
DESPLAZA CASI A LA VELOCIDAD DE LA LUZ Y QUE
SE EXTIENDE MUCHO MÁS ALLÁ QUE LA PROPIA
GALAXIA. REPASAMOS AQUÍ ALGUNOS DE LOS
HALLAZGOS RECIENTES SOBRE SUS REGIONES CENTRALES,
EN LOS QUE HA PARTICIPADO EL IAA-CSIC*

2019 LA PRIMERA IMAGEN

“Hemos tomado la primera imagen de un agujero negro. Se trata de un hito histórico en astronomía obtenido por un equipo de más de 200 personas”, comentaba el director del EHT, Sheperd S. Doeleman (Harvard CfA)

Los agujeros negros son objetos cósmicos extraordinarios, de una enorme masa pero extremadamente compactos. La presencia de estos objetos afecta a su entorno de forma extrema, curvando el espaciotiempo y sobrecalentando cualquier material colindante. Cuando se encuentra inmerso en una región brillante, como un disco de gas incandescente, se espera que un agujero negro genere una región oscura similar a la de una sombra, algo ya predicho por la relatividad general de Einstein. Esta sombra, causada por la curvatura gravitacional y la absorción de luz por el horizonte de sucesos, revela mucho sobre la naturaleza de esos fascinantes objetos y permitió medir la colosal masa del agujero negro de M87, unas 6500 millones de veces más masivo que nuestro Sol.



Múltiples observaciones independientes del EHT, analizadas cada una con distintos métodos de reconstrucción de imágenes, han revelado una estructura en forma de anillo con una región oscura central: la sombra del agujero negro.

2021 LOS CAMPOS MAGNÉTICOS

La colaboración del EHT revelaba una nueva perspectiva del objeto masivo en el centro de la galaxia M87: cómo se ve en luz polarizada. Se trata de la primera vez que se ha podido medir polarización, la “firma” de los campos magnéticos, tan cerca del borde de un agujero negro. Las observaciones son clave para explicar cómo la galaxia M87, ubicada a 55 millones de años luz de distancia, puede lanzar chorros de material muy energéticos desde su núcleo. El equipo descubrió que solo los modelos teóricos con gas fuertemente magnetizado pueden explicar lo que están viendo en el horizonte de sucesos.

Izda. Imagen del agujero negro supermasivo en M87 en luz polarizada. Fuente: Colaboración EHT.



2021 LA ESTRUCTURA DE DOBLE HÉLICE DEL CHORRO

Un grupo científico internacional observaba cómo el chorro de M87 es canalizado por la presencia de un campo magnético y adquiere una estructura de doble hélice. Las imágenes revelaron que el campo magnético mantiene la forma helicoidal hasta una distancia de unos 3300 años luz desde el agujero negro supermasivo. Aunque se habían detectado este tipo de configuraciones del campo magnético en otras galaxias, nunca se había observado a distancias tan lejanas del agujero negro central. El campo magnético debería debilitarse con la distancia al agujero negro, de modo que la estructura helicoidal inicial debería perderse. Sin embargo, el equipo científico sugiere que, en este caso, inestabilidades presentes en el chorro pueden reordenar el campo magnético y mantener la estructura hasta distancias muy lejanas. Estas inestabilidades producen regiones de alta presión en el material, lo que comprime las líneas de campo magnético y aumenta su intensidad.



Se puede apreciar la estructura de doble hélice en la parte interna del chorro, que se origina en el punto brillante a la izquierda, el núcleo de la galaxia. Fuente: Pasetto et al., Sophia Dagnello, NRAO/AUI/NSF.

2023 SOMBRA Y CHORRO

Por primera vez se observaba tanto el agujero negro como el chorro de partículas que emerge a altísima velocidad desde el centro de M87.

La luz de M87 es producida por la interacción entre electrones altamente energéticos y campos magnéticos, un fenómeno conocido como radiación sincrotrón. Estas observaciones revelaban algo sobre la naturaleza del propio agujero negro: consume materia a un ritmo bajo, convirtiendo solo una pequeña fracción en radiación.

Además, se encontró algo sorprendente en los nuevos datos: la radiación de la región interna cercana al agujero negro es más amplia de lo esperado, lo que podría significar que hay algo más que gas cayendo. También podría existir algún tipo de viento galáctico, que produce turbulencia alrededor del agujero negro.



2023 UN CHORRO OSCILANTE

El mecanismo de transferencia de energía entre los agujeros negros supermasivos, los discos de acreción y los chorros aún se desconoce. La teoría predominante sugiere que se puede extraer energía de un agujero negro en rotación, permitiendo que parte del material que rodea el agujero negro sea expulsado a gran velocidad. Sin embargo, la rotación de los agujeros negros supermasivos, un

factor crucial en este proceso, nunca se había observado directamente. Datos de veintitrés años del centro de la galaxia M87 han revelado que el chorro que emerge del agujero negro a altísima velocidad oscila hacia arriba y hacia abajo con una amplitud de unos diez grados. El análisis del equipo de investigación indica que el eje de rotación del disco de acreción se desalinea con el eje de giro del agujero negro, lo que genera un chorro oscilante, o en precesión. La detección de esta precesión constituye una evidencia inequívoca de que el agujero negro supermasivo de M87 se halla, en efecto, girando, lo que abre nuevas dimensiones en nuestra comprensión de estos objetos.

Imagen: representación esquemática del modelo de disco de acreción inclinado. Fuente: Yuzhu Cui et al. 2023, Intouchable Lab@Openverse y Zhejiang Lab.

EL MOBY DICK DE...

... FRAN POZUELOS (IAA-CSIC)

LA BÚSQUEDA DE PLANETAS HABITABLES EN NUESTRO VECINDARIO SOLAR: SINERGIAS ENTRE SPECULOOS Y TESS

La búsqueda de vida más allá de la Tierra ha cautivado la imaginación de la humanidad durante siglos. Desde los primeros telescopios que se alzaron hacia los cielos hasta las misiones espaciales más avanzadas de hoy en día, los seres humanos hemos estado obsesionados con la idea de que no estamos solos en el vasto cosmos; de que, en algún sitio, en algún lugar, existe alguien más.

¿Somos los seres vivos de la Tierra una anomalía cósmica? O, por el contrario, ¿somos solamente un paso más en la evolución del universo? Ojo, que aquí no estamos hablando de vida inteligente, eso nos daría para otros cuantos *Moby Dicks* y, posiblemente, para acalorados y apasionantes debates. La pregunta fundamental que perseguimos con tenacidad es: ¿estamos solos en el universo? La posibilidad de que existan otras formas de vida, ya sea en planetas distantes, lunas heladas o incluso en las profundidades de los océanos extraterrestres, nos llena de abrumadora emoción y asombro. Y es que esta búsqueda no es solo un ejercicio científico, sino también una exploración de nuestra propia identidad, de entender el lugar que ocupamos en el universo.

Y, aunque responder a esta pregunta no es una tarea sencilla, la comunidad científica ha diseñado todo tipo de experimentos para poder encontrar cualquier atisbo de vida, presente o pasada. Uno de esos métodos es el de buscar biomarcadores en las atmósferas planetarias. Pero, ¿qué son los biomarcadores? Se trata de un conjunto de gases cuya presencia en la atmósfera no se puede explicar de otra manera más que recurriendo a un origen



Doctor en astrofísica por la Universidad de Granada y el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC). Tras una etapa postdoctoral de seis años en la Universidad de Liège (Bélgica), ahora es investigador permanente en el IAA-CSIC. Su investigación se centra en la búsqueda y caracterización de sistemas planetarios, principalmente aquellos con planetas potencialmente habitables. Trabaja en varios consorcios internacionales como SPECULOOS, CARMENES, TESS (NASA), CHEOPS (ESA) y PLATO (ESA).

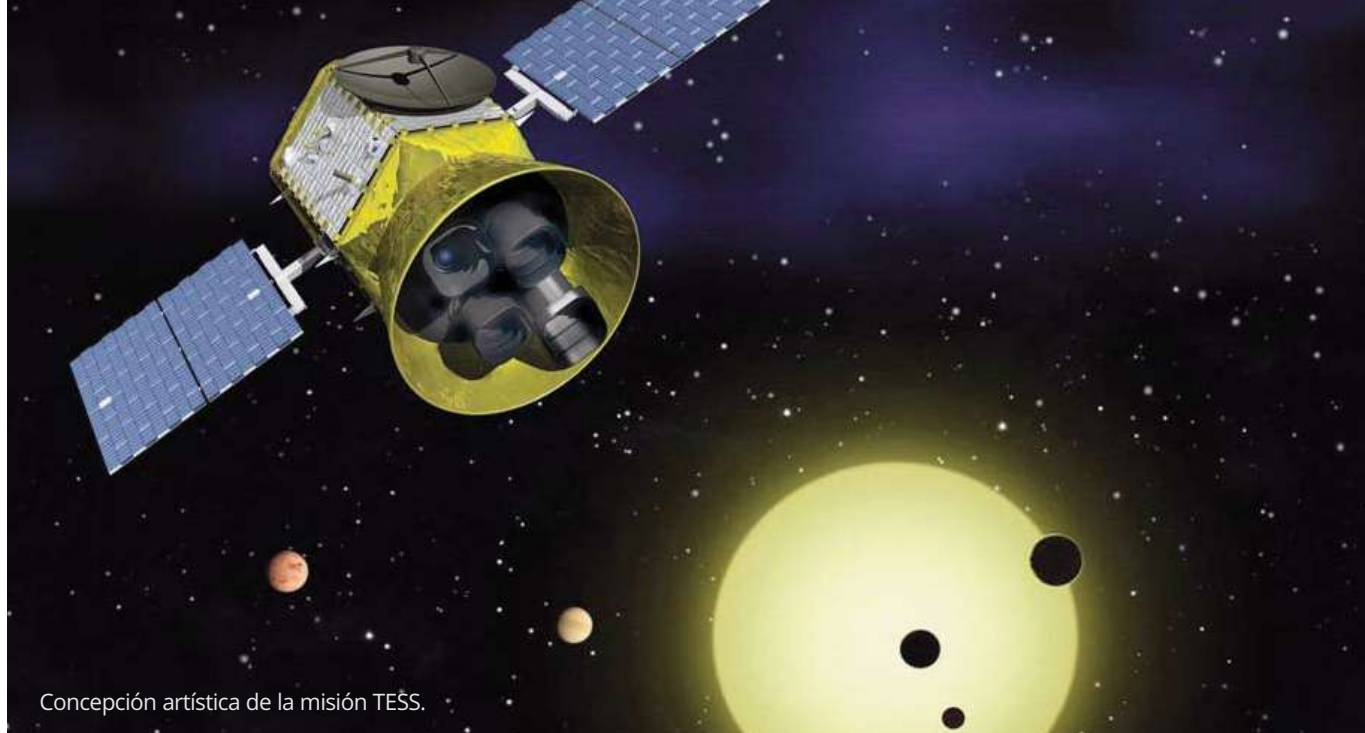


Los cuatro telescopios del Observatorio Austral SPECULOOS que operan en Cerro Paranal, Chile.

biológico, es decir, no puede ser atribuida a un origen abiótico ni a una síntesis química natural como explicación alternativa. Por ejemplo, en el caso de la Tierra, la coexistencia del oxígeno y el metano solo puede explicarse debido a la frenética actividad biológica de nuestro planeta. En este contexto, por tanto, cuando hablamos de vida, nos referimos a algún tipo de metabolismo que deje su huella en la atmósfera del planeta que habita, al igual que hacemos los seres vivos en la Tierra. La cuestión es que estamos alcanzando (aunque aún nos queda recorrido) la tecnología necesaria para poder distinguir esos biomarcadores (definir bien qué es un biomarcador también daría lugar a largas discusiones), que son terriblemente tenues y requieren muchísimas horas de observación y minuciosos análisis. Pero, antes de dedicarnos a buscar esos biomarcadores, el primer paso es identificar cuáles son los mejores lugares donde buscar esas señales de vida. ¿Qué quiere decir “identificar los mejores lugares”? Bueno, pues que no solo vale con buscar planetas que estén en la zona habitable de sus estrellas, ni

buscar análogos a la Tierra: tenemos también que pensar en cómo optimizar las observaciones, es decir, pensar dónde será más fácil ver esas bioseñales, si es que existen.

En este contexto nació a finales de 2017 el proyecto pionero SPECULOOS (*Search for habitable Planets EClipsing ULtra-cOOl Stars*), acrónimo que responde a “búsqueda de planetas habitables que eclipsan estrellas ultrafrías”. Con masas que varían entre el 7% y el 10% de la del Sol, estas estrellas del tamaño de Júpiter se encuentran en la parte más extrema de la secuencia principal, presentan temperaturas oscilan entre 2300 y 2900 grados y sus luminosidades son inferiores al 0,1% de la solar. Estas propiedades hacen que sus zonas habitables correspondan a órbitas de solo unos pocos días, maximizando así la probabilidad y frecuencia de tránsitos de un posible planeta templado. Además, planetas del tamaño de la Tierra orbitando estas pequeñas estrellas producen tránsitos de aproximadamente el 1%, lo que está al alcance de los telescopios terrestres. Todas estas características hacen que



Concepción artística de la misión TESS.

este sea el tipo de planeta donde más fácil es detectar biomarcadores. SPECULOOS es la evolución del proyecto TRAPPIST, el prototipo que funcionó entre 2011 y 2016 y encontró el famoso sistema TRAPPIST-1, que contiene siete planetas tipo Tierra, tres de ellos en la zona habitable, formando una cadena de resonancia. Estos planetas encabezan todas las listas de posibles mundos habitables, y son los primeros planetas, fuera del Sistema Solar, cuyas atmósferas serán sondeadas en busca de señales de vida. Una prueba de ello es que se trata del sistema planetario que más horas de observación está recibiendo con el telescopio espacial James Webb. TRAPPIST-1 es, por tanto, la prueba del gran potencial que tiene el proyecto SPECULOOS para encontrar posibles mundos habitables, o incluso, habitados.

Este proyecto está liderado por la Universidad de Lieja (Bélgica), y también participan en él las universidades de Cambridge y Birmingham en el Reino Unido, el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en Estados Unidos, y la Universidad de Berna en Suiza. Cuenta con un catálogo de unas mil setecientas de estas estrellas que se encuentran a menos de cuarenta pársecs (o unos ciento treinta años luz) de nosotros, y que son monitoreadas para buscar planetas en tránsito con seis telescopios de un metro repartidos por observatorios tanto del hemisferio norte como sur. Estos telescopios están especialmente diseñados para tener una gran precisión fotométrica en el infrarrojo cercano, donde más emiten estas pequeñas estrellas rojas. Cada una de estas estrellas deberá ser observada unas doscientas

cincuenta horas para barrer por completo su zona habitable; es decir, en total, para completar el proyecto se necesitarán en torno a quince años. Lo que es mucho tiempo. Cabe entonces preguntarnos ¿no es posible acelerar este proceso de búsqueda? La respuesta es sí, y para ello usamos el telescopio espacial TESS de la NASA.

La misión TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*) fue lanzada a mediados de 2018 con el objetivo principal de buscar exoplanetas pequeños, de entre una y cuatro veces el tamaño de la Tierra, transitando estrellas brillantes y cercanas. Después de cinco años de operaciones, TESS, operando con sus cuatro cámaras de alta sensibilidad y habiendo observado casi un 90% del cielo, ha dejado claro que es un cazador de planetas extraordinario. En este tiempo ha descubierto unos cuatrocientos planetas, ha generado pistas sobre la existencia de otros siete mil candidatos que la comunidad científica escudriña para poder confirmar, y ha producido datos públicos de varios cientos de miles de estrellas.

La unión de puntos parece obvia: TESS encontrará planetas orbitando estrellas ultrafrías mucho más rápido que SPECULOOS. Pues no, no es así. A pesar de todos los datos que TESS ofrece, sus cámaras no están optimizadas para observar en el infrarrojo cercano, lo que hace que, aunque haya observado casi todas las estrellas del proyecto SPECULOOS, la precisión fotométrica que alcanza, es decir, la calidad de los datos, no es tan precisa como para encontrar de forma “evidente” planetas pequeños orbitando estas estrellas. La señal que estos planetas producen en estos datos es extremada-

mente baja, apenas un poco por encima del ruido. Esto hace que los softwares de búsqueda oficiales de TESS sean ciegos a estos planetas. Y justamente aquí nace nuestra oportunidad, ¿y sí somos capaces de refinar y mejorar el proceso de búsqueda lo suficiente como para detectar planetas en tránsito en estos datos con muy baja señal-ruido?

Se puede decir que este, justamente este, ha sido mi Moby Dick durante los últimos cinco años. Tiempo durante el cual he liderado un equipo de trabajo donde, a base de muchas pruebas y desarrollo de algoritmos, hemos creado un software de búsqueda de tránsitos planetarios optimizado de tal manera que podamos encontrar planetas tipo terrestre orbitando estrellas ultrafrías del catálogo de SPECULOOS usando datos de TESS. Un software al que hemos llamado SHERLOCK. Este software promete acelerar el ritmo de detecciones del proyecto SPECULOOS un 50%, lo que nos permitirá tener una lista de varios sistemas óptimos donde buscar biomarcadores cuando la próxima generación de grandes telescopios vea su primera luz al final de esta década, y donde el europeo de casi cuarenta metros, el *Extremely Large Telescope*, jugará un papel fundamental. Habremos puesto, así, nuestro granito de arena, para responder a la gran pregunta de si estamos solos en el universo. Sea cual sea el desenlace final, tanto si encontramos indicios de vida en otros mundos como si no, cabe recordar las palabras del genial escritor de ciencia ficción Arthur C. Clarke: “Existen dos posibilidades: o estamos solos en el universo o no lo estamos. Ambas son igualmente aterradoras”.

Los zoológicos humanos

SUSANA ESCUDERO (RTVA)

8 de septiembre de 1906. El neoyorquino Zoo del Bronx exhibe una nueva atracción. Incluso una placa sobre la jaula indica al espectador detalles sobre el valioso ejemplar que se muestra al otro lado de los barrotes, en el interior de la denominada “Casa de los Monos”. Tanto el director del zoo, William Hornaday, como algunos colegas suyos, todos prominentes naturalistas americanos, lo consideran uno de los más instructivos espectáculos para la educación científica de la ciudadanía. Natural de África, había llegado a Nueva York siguiendo las indicaciones del entonces director de Museo Americano de Historia Natural, Hermon Bumpus, para ser exhibido junto a un orangután. Ese valioso ejemplar era este:



Ota Benga, un pigmeo que había llegado a Estados Unidos como parte de la Exposición mundial de San Luis de 1904.

Puede que esto parezca una locura, pero de mediados del siglo XIX a mediados del XX se hicieron muy populares en todo el mundo un tipo de espectáculos en los que los intereses de empresarios y científicos, junto con el surgimiento de nuevas formas de consumismo y el ansia de una clase media emergente por conocer las realidades de otras partes del planeta, hicieron posible que se exhibieran seres humanos.

Sí, como lo lees: se exhibían personas.

Estamos en el momento histórico de las grandes exposiciones nacidas para mostrar el desarrollo tecnológico ligado a la revolución industrial, que después dieron lugar a las exposiciones universales y estas a las coloniales. Oficiales o privadas, nacionales o internacionales, casi siempre incluían indígenas.

¿Y cómo eran estos espectáculos? Dejarme que lo explique con un ejemplo que se generalizó para todas. En 1877 el Jardín Zoológico de Aclimatación de París fue transformado en un jardín de aclimatación antropológico, es decir, en un auténtico zoológico humano en el que fueron exhibidas familias enteras de distintas etnias...

A la intemperie se reproducían los poblados y chozas en las que vivían para mostrarlos, como si estuvieran en su hábitat natural, a los miles de personas que pasaron a verlos. Bailes, cantos, gritos o sacrificios con sangre de animales eran los ingredientes que no podían faltar en estas exposiciones en donde se ofrecía exotismo, aderezado con un poquito de ciencia y otro poquito de sensualidad.

Se les calcula un público de unos mil cuatrocientos millones de visitantes. El número de individuos expuestos, de todas las edades, incluidos niños transportados de ultramar o nacidos en las propias exposiciones, rondaría los treinta y cinco mil. A los científicos (estamos en el momento del nacimiento y desarrollo de dos disciplinas científicas: la antropología física y la etnología), tener especímenes de seres humanos a la mano les permitió, además, hacer clasificaciones y teorías raciales (y racistas) inspiradas en la clasificación de animales y permeadas por la reciente teoría de la evolución.

Con estas cifras, es fácil imaginarse lo frecuentes y numerosos que fueron estos espectáculos. Aunque cada uno de ellos tenía sus particularidades, podríamos clasificarlos en tres tipos principales: las exposiciones etnológicas comerciales, las exposiciones coloniales de los Estados y las exposiciones misioneras (tanto de la iglesia católica como de la protestante).

Los objetivos de cada una de ellas eran distintos: las privadas tenían como objeto hacer dinero; eran un negocio. Las exposiciones de los Estados buscaban mostrar los proyectos coloniales oficiales y las iniciativas privadas

desarrolladas en las colonias para llevar la riqueza y el bienestar de la metrópoli en las colonias. Por último, las exposiciones de las iglesias tenían un poco de las dos anteriores: hacer propaganda sobre la labor misionera y de evangelización, y recaudar fondos para poder continuar haciéndola.

En todas ellas la relación con los indígenas solía estar regulada, incluso por medio de contratos. Otra cosa que cabría preguntarse es si las personas mostradas eran totalmente conscientes de a lo que se comprometían cuando accedían a formar parte de estos espectáculos: las condiciones en las que viajaban, en las que iban a vivir (se alojaban en la propia exposición) y su limitación de movimientos, ya que en muchos casos no estaban autorizados a salir de la exposición, bien porque no podían desenvolverse en las ciudades o bien porque directamente se lo prohibían (no era cuestión de que el negocio se pudiera ver gratis por la calle). Sin embargo, no todas las exposiciones eran iguales. Si os parece, vamos a acercarnos a algunas de ellas.

Exposiciones comerciales

Las más destacadas en Europa fueron las del empresario alemán Carl Hagenbeck. Su gran éxito consistió en que se inventó un espectáculo donde se exhibían a la vez animales salvajes y grupos humanos, supuestamente del mismo territorio, en un decorado que recreaba su espacio natural de origen. Los espectáculos de Hagenbeck se realizaban generalmente en zoológicos. Algo que fue reproducido hasta la saciedad.

También es muy representativo de este tipo de espectáculos promovidos por particulares los que se realizaron en el Jardín de Aclimatación de París desde 1877 y hasta la Primera Guerra Mundial.

Este era un gran negocio vestido por el halo de ciencia antropológica porque el director era el director de propio jardín, el naturalista Albert Geoffroy Saint-Hilaire. Al principio interesó a los científicos, pero a partir de 1886 la Sociedad Antropológica de París se distanció de lo que realmente era un espectáculo para el recreo popular difícilmente justificable desde un punto de vista ético.

Hubo también otro tipo de espectáculos étnicos más profesionalizados. Aquellos en los que se necesitaba que los nativos demostraran habilidades e hicieran representaciones que atrajeran al público. El más serio y ela-



borado de todos en el contexto del circo y espectáculos dramatizados, el más popular y aclamado, fue el de William Frederick Cody, Buffalo Bill. En el espectáculo intervenían indios, vaqueros, mexicanos y miembros de varias tribus indias americanas.

Este tipo de espectáculos comerciales se prolongaron hasta la década de los treinta del siglo XX, momento en que fueron desplazados por los nuevos intereses del público: el cine y el turismo de ultramar.

Exposiciones coloniales de los estados

Nacieron con el objetivo de lanzar un mensaje educativo que reforzara la conciencia nacional de sus ciudadanos, y también para proyectar una imagen de poder a las potencias competidoras en el exterior. Pero pronto se dieron cuenta de que estos contenidos educativos iban a resultar poco atractivos o aburridos al público, así que les añadieron... pueblos indígenas.

Las verdaderas exposiciones coloniales comienzan en la década de 1880, tanto de forma autónoma como conectadas a las exposiciones universales. La que abrió el

camino, la primera, fue la Exposición Internacional Colonial y de Exportación de Amsterdam de 1883. Le siguieron Londres 1886, y la Expo de Filipinas en el Parque del Retiro de Madrid 1887, donde se mostraban grupos indígenas de diferentes grados de "civilización".

Por un lado, estaban los ya "civilizados" (cuando en ese momento se utilizaba esa palabra, lo que en realidad se quería decir era "bautizados"). Estos tenían la consideración de invitados especiales, que se alojaban en pensiones y se encargaban de realizar tareas más sofisticadas, ya que habían aprendido oficios.

Luego estaban otros grupos que se mostraban como paganos, entre los que también había grados: los llamados "moros", que sí tenían una religión (musulmana) y que también estaban en pensiones, y por último los considerados "salvajes", todavía por evangelizar y que sí vivían en el recinto. De estos grupos murieron tres personas a lo largo de la exposición.

La verdadera eclosión de este tipo de exposiciones se produjo en las décadas de los 20 y 30 del siglo XX. Una de las más destacadas de este momento histórico fue la de Oporto en 1934, que recordaba mucho en sus formas y tratamientos a las exposiciones del anterior siglo XIX.

La última exposición colonial fue la sección del Congo Belga de la Expo de Bruselas de 1958. Supuestamente su objetivo era mostrar la hermandad entre los pueblos. Los congoleños ya no vivían en el interior del recinto de la muestra y su trabajo consistía en hacer demostraciones de sus oficios ante el público. Pero aquí los auténticos salvajes fueron los espectadores europeos, que se comportaban de forma maleducada gritándoles e incluso tirándoles comida y otros obje-

tos, por lo que muchos de los congoleños hicieron sus maletas y abandonaron la exposición.

Exposiciones misioneras

Los primeros en hacer este tipo de exposiciones fueron los protestantes a mediados del siglo XIX, y evolucionaron hasta alcanzar dimensiones espectaculares en el primer tercio del siglo XX. Al principio mostraban objetos etnológicos. Luego se sofisticaron con dioramas y grupos escultóricos. Pero después, cuando la gente comenzó a cansarse de estos elementos, recurrieron a grupos de nativos. Eso sí, había una gran diferencia con los anteriores tipos de exposiciones: en las de la iglesia eran muchas veces representaciones hechas por "invitados" que ya estaban bautizados.

Pero no todo fue tan bonito en estas exposiciones religiosas. La iglesia católica italiana tuvo, en la única exposición de este tipo que realizó, a siete nativos de dos etnias diferentes viviendo en unas condiciones cuando menos cuestionables.

Hubo muchísimas muestras de este tipo desarrollado por la iglesia protestante, especialmente (cómo no) en Estados Unidos.

Eran exposiciones muy similares a las coloniales, con reproducción de los poblados y decorados del ambiente natural de origen. Pero la diferencia, muy importante, es que en este caso los nativos participaban de otra forma y con otro trato: los que hablaban mejor trabajaban como guías ataviados con sus trajes y los que no, hacían manualidades, vendían suvenires o hacían representaciones de su vida anterior a la cristianización. Los organizadores defendían su presencia diciendo que se trataba en realidad de actores.

En las décadas de los años 20 y 30 del siglo XX la presencia de nativos fue disminuyendo, pero para mantener el interés del público se recurrió a representaciones del modo de vida de los nativos, combinadas con escenas de interacción misionera, con hombres y mujeres vestidos y maquillados como nativos (aun sin serlo). Algunas eran representaciones cortas y otras largas y con varios actos a la altura de grandes representaciones teatrales.

Hemos paseado por uno de los espectáculos de más éxito de la historia. Recordad la cifra: se calcula 1.400 millones de visitantes. Pero ¿tú crees que estos espectáculos, de dudoso gusto voyerista, en donde se exhiben seres humanos, son ya cosa del pasado?



Se fotografía por primera vez la sombra de un agujero negro junto a su potente chorro de partículas

EL IAA-CSIC PARTICIPA EN LA OBTENCIÓN DE UNA PANORÁMICA INÉDITA, QUE REVELA QUE EL AGUJERO NEGRO DE LA GALAXIA M87, EL PRIMERO DEL QUE SE OBTUVO UNA IMAGEN, CONSUME MATERIA A UN RITMO MUY BAJO

Un equipo científico internacional, con la participación del IAA-CSIC, ha obtenido nuevos datos que aportan una visión inédita de un agujero negro supermasivo: por primera vez, se observa tanto el agujero negro como el chorro de partículas que emerge a altísima velocidad desde el centro de la galaxia M87. Las nuevas observaciones, obtenidas con el *Global Millimetre VLBI Array* (GMVA), el *Atacama Large Millimetre/submillimetre Array* (ALMA) y el *Greenland Telescope* (GLT), muestran por primera vez cómo se forman potentes chorros de partículas a partir del material que cae al agujero negro de M87. Los resultados se han publicado en la revista *Nature*.

M87 es una galaxia elíptica localizada a unos 55 millones de años-luz de la Tierra. En 2019, el Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT) obtuvo por primera vez la imagen del agujero negro supermasivo que alberga su núcleo, con unos 6500 millones de veces la masa del Sol. Aunque los agujeros negros muestran un campo gravitatorio tan intenso que ni la luz puede escapar de ellos, existen mecanismos a través de los que liberan parte del material que queda atrapado en sus cercanías formando un disco de acrecimiento, como los chorros a alta velocidad. M87, por ejemplo, presenta un chorro que emerge de sus



regiones centrales y se extiende mucho más allá del tamaño de la propia galaxia que lo alberga.

La imagen obtenida ahora revela por primera vez la conexión entre el flujo de acreción cerca del agujero negro supermasivo central y el origen del chorro. Los modelos teóricos plantean que el material circundante cae en el agujero negro en un proceso conocido como acreción, pero hasta ahora no se había observado directamente.

“Hemos completado otro capítulo importante en el estudio de M87, al obtener el primer vistazo de cómo su agujero negro central se alimenta de su disco de acreción y lanza el chorro cósmico que se observó por primera vez hace más de un siglo”, apunta José Luis Gómez, investigador del IAA-CSIC que participa en el hallazgo.

La luz de M87 es producida por la interacción entre electrones altamente energéticos y campos magnéticos, un fenómeno conocido como radiación sincrotrón. Las nuevas observaciones revelan detalles novedosos sobre la ubicación y la energía de estos electrones, y también indican algo sobre la naturaleza del propio agujero negro: no tiene mucha hambre. Consume materia a un ritmo bajo, convirtiendo solo una pequeña fracción en radiación.

Además, se encontró algo sorprendente en los nuevos datos: la radiación de la región interna cercana al agujero negro es más amplia de lo esperado, lo que podría significar que hay algo más que gas cayendo. También podría existir algún tipo de viento galáctico, que produce turbulencia alrededor del

agujero negro.

La gran resolución y sensibilidad de la red intercontinental de telescopios empleada ha permitido obtener esta panorámica. El diámetro del anillo medido por el Global Millimetre VLBI Array es de 64 microarcosegundos, lo que corresponde al tamaño de una pelota de fútbol situado en la Luna visto desde la Tierra. “Estos sorprendentes resultados son solo el comienzo de una era fascinante en la radioastronomía. Nuestro equipo de investigación continuará explorando M87 y otros objetos similares utilizando la resolución inédita que pueden ofrecer las grandes combinaciones de antenas como GMVA, KVN y EHT”, adelanta Thalia Traianou, investigadora del Instituto de Astrofísica de Andalucía que participa en el trabajo.

Un planeta de tipo terrestre que podría hallarse cubierto de volcanes

EL IAA-CSIC PARTICIPA EN EL DESCUBRIMIENTO DE UN TERCER PLANETA EN TORNO A LA ESTRELLA CERCANA LP791-18. CON UN TAMAÑO ALGO MAYOR QUE EL NUESTRO, SU INTERACCIÓN GRAVITATORIA CON EL PLANETA MÁS MASIVO DEL SISTEMA PODRÍA GENERAR UNA INTENSA ACTIVIDAD VOLCÁNICA

Ya se conocían dos planetas en torno a la estrella enana roja LP791-18, situada a tan solo 90 años luz de distancia: la supertierra LP791-18b, de tipo rocoso y con una masa un 20% mayor que la de la Tierra, y el minineptuno LP791-18c, un planeta gaseoso con unas nueve veces la masa terrestre. La revista *Nature* difundió el hallazgo de un tercer planeta de tipo terrestre, LP791-18d, cuya órbita en torno a la estrella lo acerca peligrosamente al minineptuno. Esto produce una interacción gravitatoria que deforma ligeramente el planeta recién hallado y calienta su interior, lo que a su vez genera posiblemente una actividad volcánica generalizada a lo largo de su superficie.

“El planeta LP791-18d muestra lo que se conoce como acoplamiento de marea, lo que significa que el mismo lado mira constantemente a su estrella –apunta Björn Benneke, investigador de la Universidad de Montreal que dirige el estudio–. El lado diurno probablemente se halla demasiado caliente para que exista agua líquida en la superficie, pero la cantidad de actividad volcánica que sospechamos que ocurre en todo el



planeta podría sostener una atmósfera, lo que podría permitir que el agua se condense en el lado nocturno”.

Durante cada órbita, el minineptuno c y el planeta terrestre d pasan muy cerca uno del otro. Cada aproximación produce un tirón gravitacional del primero sobre el segundo, haciendo que su órbita dibuje una trayectoria algo elíptica en la que se deforma ligeramente cada vez que gira alrededor de la estrella. Estas deformaciones pueden crear suficiente fricción interna para calentar el interior del planeta y producir actividad volcánica, un fenómeno similar al que el planeta Júpiter ejerce sobre su satélite Ío, que ostenta el récord en actividad volcánica de todo el Sistema Solar.

El planeta d se encuentra en el borde interior de la zona habitable, la región alrededor de una estrella donde las condiciones de presión y temperatura

permitirían la existencia de agua líquida en la superficie de un planeta. Si el planeta recién hallado es geológicamente tan activo como sospecha el equipo científico, podría mantener una atmósfera y las temperaturas podrían descender lo suficiente en el lado nocturno del planeta como para que el agua se condense en la superficie.

“Mientras el equipo de la Universidad de Montreal analizaba observaciones con el telescopio Spitzer (NASA), nuestro equipo descubrió la señal correspondiente al planeta LP791-18d utilizando un software propio de búsqueda de planetas –señala Francisco J. Pozuelos, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que participa en el trabajo–. Al procesar los datos del telescopio espacial TESS nuestro algoritmo detectó la señal, que había pasado desapercibida, y comenzamos una campaña de observación

con telescopios terrestres utilizando la red de telescopios SPECULOOS y coordinándonos con los demás equipos involucrados en el descubrimiento”.

Una gran pregunta abierta en astrobiología, el campo que estudia los orígenes de la vida, es si la actividad tectónica o volcánica resulta necesaria para la aparición de la vida: además de proporcionar una atmósfera, estos procesos podrían mover materiales que de otro modo se hundirían y quedarían atrapados en la corteza, incluidos aquellos que se consideran importantes para la vida, como el carbono.

“El planeta c ya ha sido aprobado para su observación con el telescopio espacial James Webb, recientemente lanzado, y creemos que el planeta d también es un candidato excepcional para los estudios atmosféricos”, concluye Francisco J. Pozuelos (IAA-CSIC).

La primera detección en radio de una supernova de tipo Ia aporta luz al origen de estas explosiones

EL TRABAJO, EN EL QUE PARTICIPA EL IAA-CSIC, MUESTRA QUE LA EXPLOSIÓN SE PRODUJO EN UN SISTEMA DOBLE DE ESTRELLAS EN EL QUE UNA ENANA BLANCA ROBABA MATERIAL DE SU COMPAÑERA, DE TIPO SOLAR

Las supernovas de tipo Ia se producen cuando una enana blanca, el “cadáver” de una estrella similar al Sol, absorbe material de una estrella compañera y alcanza una masa crítica, equivalente a 1,4 masas solares, lo que desencadena una explosión cuya luminosidad será, dado su origen, similar en casi todos los casos. Esta uniformidad convirtió a las supernovas de tipo Ia en los objetos idóneos para medir distancias en el universo, pero se desconocía el origen y la naturaleza del sistema progenitor. Ahora, la primera observación en radio de una supernova de tipo Ia confirma que procede de un sistema doble de estrellas formado por una enana blanca y una estrella de tipo solar. Los resultados se publicaban en la revista *Nature*.

“Cuando vimos, en la supernova SN2020eyj, indicios de una fuerte interacción con el material de la estrella compañera, tratamos de observar la explosión en radio, algo que llevaba intentándose sin resultado durante décadas”, explica Erik Kool, investigador de la Universidad de Estocolmo y autor principal del artículo.

Las supernovas de tipo Ia siempre contienen una enana blanca, que recibe material de su compañera. Sin embargo, se desconocía si esa compañera era una enana blanca o una estrella similar al Sol, algo que



Conceptión artística del sistema que produjo la supernova, en el que una estrella enana blanca absorbe material de su estrella compañera. Fuente: Adam Makarenko/W. M. Keck Observatory.

podían revelar las imágenes en radio.

“Esta primera detección en radio de una supernova de tipo Ia es un hito que nos ha permitido demostrar que la enana blanca que explotó estaba acompañada de una estrella normal, no degenerada, antes de la explosión –indica Javier Moldón, investigador del IAA-CSIC que participa en el hallazgo–. Además, con estas observaciones podemos estimar la masa y geometría del material que rodea la supernova, lo que nos permite entender mejor cómo era el sistema antes de la explosión”.

Este trabajo, cuya contribución en datos de radio se lideró desde el IAA-CSIC, ha permitido confirmar que el material expulsado en la explosión de supernova chocó, tras viajar sesenta días, con el material que rodeaba el sistema, compuesto mayormente por helio, lo que indica que la estrella compañera no era una

enana blanca. Además, los modelos preveían que la emisión en radio, en caso de existir, tardaría muchos meses en ser detectable y, en efecto, el equipo científico tuvo que esperar año y medio para detectar la contrapartida en radio de la supernova.

“La inusual curva de luz de SN 2020eyj, la emisión infrarroja, la detección de líneas de emisión del helio y la inédita detección en radio hacen única a esta supernova, un tesoro de información con implicaciones en múltiples campos de investigación –apunta Miguel Pérez Torres, investigador del IAA-CSIC que participa en el trabajo–. Estudiar más sistemas similares nos permitirá comprender mejor el origen de estas candelas estándar y la evolución química de galaxias”.

“Ahora que hemos demostrado que

las observaciones en radio pueden proporcionar información directa y única para entender este tipo de supernovas, se abre un camino para estudiar estos sistemas con la nueva generación de instrumentos en radio, como el Square Kilometre Array Observatory (SKAO) en el futuro”, concluye Javier Moldón (IAA-CSIC).

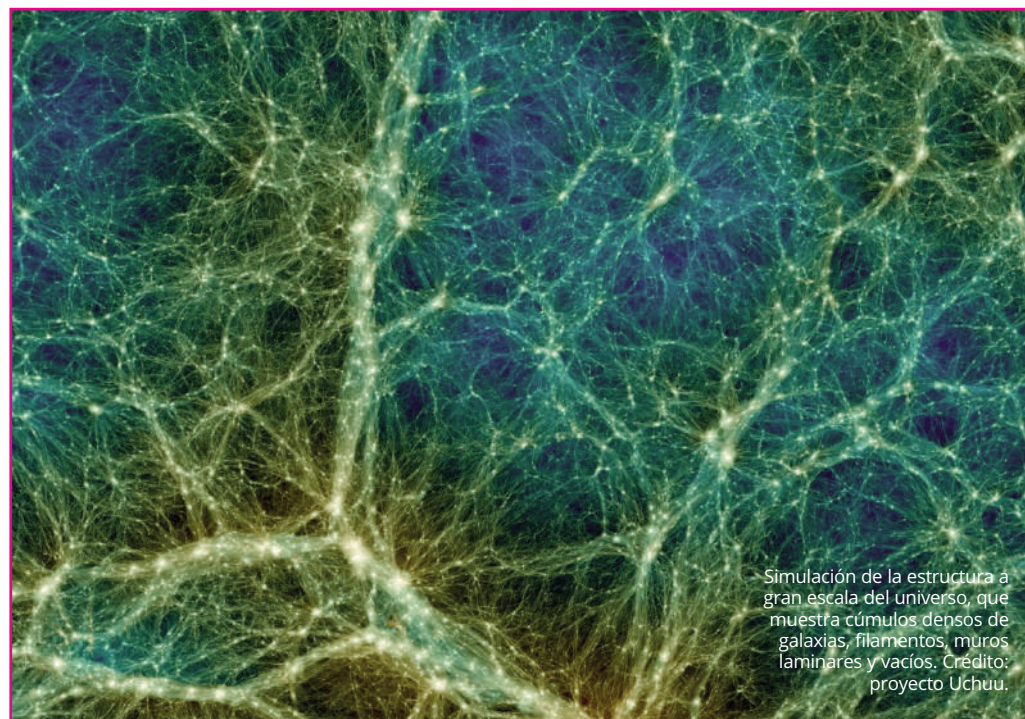
El resultado ha sido posible gracias a e-MERLIN, un conjunto de radiotelescopios de muy alta resolución angular, y el análisis de los datos se ha realizado desde el prototipo español de Centro Regional de SKA (SPSRC) del IAA-CSIC, que cuenta con el apoyo del proyecto Severo Ochoa del IAA y que facilita el procesamiento de datos de observatorios precursores del SKAO, como e-MERLIN.

Las galaxias en los grandes vacíos del universo crecen más despacio que el resto

EL IAA-CSIC PARTICIPA EN UN ESTUDIO QUE MUESTRA POR PRIMERA VEZ DE MANERA OBSERVACIONAL QUE LAS GALAXIAS EN LAS REGIONES POCO DENSAS DEL UNIVERSO EVOLUCIONAN MÁS DESPACIO QUE AQUELLAS EN ZONAS MUY POBLADAS

Las galaxias son los bloques fundamentales de la estructura a gran escala del universo, y dibujan una red en forma de esponja que muestra cúmulos densos, filamentos, muros laminares y regiones muy poco densas, conocidas como vacíos cósmicos. Estos vacíos constituyen las regiones menos densas del universo, ya que ocupan en torno al 80% de su volumen y contienen solo un 10% de su masa. Un equipo internacional publicaba en *Nature* un trabajo que muestra que las galaxias que habitan estos vacíos evolucionan más despacio que el resto.

Estudios previos habían demostrado que las galaxias de los vacíos presentan, en promedio, propiedades que se corresponden con sistemas más jóvenes y menos evolucionados que las galaxias de los filamentos, muros y cúmulos. Sin embargo, nunca se había comprobado observacionalmente que hubiera diferencias evolutivas entre unas y otras. Con ese propósito nació el proyecto CAVITY, encabezado por la Universidad de Granada, desarrollado desde el



Simulación de la estructura a gran escala del universo, que muestra cúmulos densos de galaxias, filamentos, muros laminares y vacíos. Crédito: proyecto Uchuu.

Observatorio de Calar Alto y en el que participa el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC).

El equipo de CAVITY ha logrado estimar, por primera vez, la velocidad a la que las galaxias de los vacíos cósmicos forman estrellas a lo largo de su historia, así como el papel que juega la estructura a gran escala del universo en la evolución de las galaxias. Se trata del primer estudio estadísticamente significativo sobre la evolución de galaxias en las diferentes estructuras a gran escala del universo, con datos de unas diez mil galaxias situadas en vacíos, filamentos, muros, y cúmulos.

El equipo científico ha podido estimar las edades y masas de las estrellas que componen dichas galaxias y describir su historia de formación estelar, lo que ha revelado que las galaxias de los vacíos

evolucionan más despacio que las galaxias de las estructuras más densas.

Además, han hallado que las primeras galaxias que se formaron en el universo evolucionaron a la misma velocidad independientemente de la estructura en la que se encuentren ahora. Sin embargo, hace unos once mil millones de años, cuando el universo tenía dos mil ochocientos millones de años, las historias evolutivas de las galaxias comenzaron a divergir, lo que indica que en las primeras etapas del universo la estructura a gran escala podría no haber estado tan definida como para generar diferencias en la evolución de las galaxias que se formaban entonces, pero sí en etapas posteriores.

Esta estructura a gran escala es el resultado de la evolución del universo a partir del Big Bang, y el estudio de la distribución actual de

galaxias y sus propiedades nos permite rebobinar en el tiempo y obtener información sobre las condiciones iniciales del universo. La alta densidad de los filamentos y cúmulos acelera y altera las características de las galaxias, pero los vacíos constituyen entornos tranquilos de evolución pausada que pueden aportar luz sobre las condiciones iniciales del universo.

"Estos resultados están basados en el análisis de los espectros integrados de la zona central de las galaxias, un área de gran relevancia aunque de tamaño reducido. Estamos recopilando datos en Calar Alto con una resolución espacial que nos permitirá explorar tanto las propiedades globales como las locales de las galaxias que residen en estos vacíos cósmicos", avanza Rubén García-Benito, investigador del IAA-CSIC que participa en el trabajo y en el proyecto CAVITY.

Mínimo de Maunder y posibles implicaciones climáticas

PILARES

El registro de manchas solares desde 1610 muestra ciclos de actividad magnética con una distribución irregular de amplitudes y con un período de alrededor de once años; estos ciclos se vieron interrumpidos durante el llamado Mínimo de Maunder, entre aproximadamente 1645 y 1715. El farmacéutico, botánico y astrónomo aficionado alemán Heinrich Schwabe (1789-1875) descubrió los ciclos de actividad mientras buscaba un hipotético nuevo planeta más cercano al Sol que

Mercurio (planeta que finalmente resultó no existir).

La actividad magnética está asociada con la emergencia de flujo magnético en la fotosfera, que da lugar a manchas solares, protuberancias, llamaradas y eyecciones de materia coronal. También las auroras son una manifestación del campo magnético solar, pues son producidas en la alta atmósfera de la Tierra por el impacto de partículas procedentes del Sol, que son aceleradas a altas velocidades en la corona mediante procesos asociados a los campos magnéticos. La actividad solar es también responsable de pequeños cambios en la irradiancia solar (la potencia recibida del Sol en forma de radiación electromagnética por unidad de área perpendicular a los rayos solares), que se cree que podrían alterar el balance energético de la atmósfera terrestre.

Los ciclos se numeran a partir del que comenzó en 1755. Actualmente estamos en el ciclo solar número 25, que comenzó en diciembre de 2009 y se espera que continúe hasta 2030. Cada ciclo suele tener entre 140 y 220 manchas (en promedio 179 manchas), pero el ciclo anterior solo tuvo 115. En los setenta años del intervalo de tiempo conocido como el Mínimo de Maunder



(1645–1715) el número de manchas se redujo notablemente (quizás no más de 50). Si queremos comprender cómo se comportaba magnéticamente el Sol antes de las primeras observaciones sistemáticas a partir de 1610 (a raíz de la invención del telescopio), tenemos que hacer uso de datos indirectos de la actividad solar, como los radioisótopos cosmogénicos carbono 14 y berilio 10, tal como analizamos en esta misma sección en el número 51 de esta revista. El análisis de una serie temporal de la actividad magnética solar que se ha reconstruido a partir de las concentraciones de los isótopos cosmogénicos carbono 14 y berilio 10 en testigos de hielo polares -serie que se remonta a más de diez mil años atrás- permite extraer tres conclusiones fundamentales: el ciclo solar ha existido durante todo este tiempo, su período siempre ha sido de alrededor de once años, y una interrupción en el número de manchas (o Gran Mínimo, tal como el Mínimo de Maunder) no es una característica aislada, sino recurrente, de la actividad magnética solar.

Cómo los rayos cósmicos producen estos isótopos cosmogénicos en la atmósfera

terrestre es un tema interesante, que fue tratado en una contribución anterior (IAA 54, 2018). La llamada Pequeña Edad de Hielo, que se extendió aproximadamente entre 1300 y 1850, puso fin al óptimo climático medieval (del siglo X al XIV). Dentro de ella hubo tres periodos especialmente fríos, el primero de los cuales comenzó en 1650 y casi coincidió temporalmente con el Mínimo de Maunder. Durante este periodo la Tierra se enfrió (aunque quizás no globalmente, sino sobre todo el hemisferio norte), los glaciares de los Alpes avanzaron y el río Támesis se congelaba regularmente en invierno.

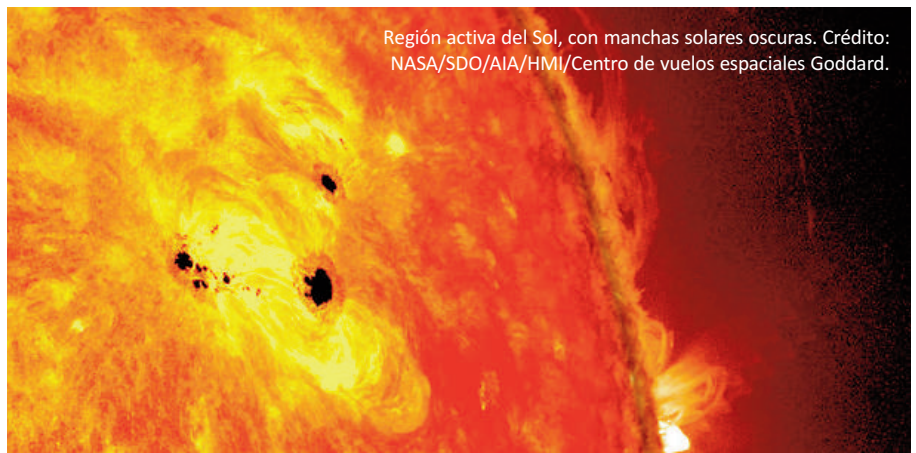
Muchos científicos creen que hay una relación de causa y efecto entre ambos fenómenos. En tal caso se plantea la pregunta de cómo una disminución de la actividad magnética solar puede influir en el clima enfriándolo. ¿Se produjo ese enfriamiento porque el Sol emitía menos energía durante el Mínimo? Hay varios posibles mecanismos, no mutuamente excluyentes, que vamos a analizar brevemente a continuación.

[1] Una posibilidad es que no haya habido ninguna relación causal entre el

enfriamiento de la atmósfera (Pequeña Edad de Hielo) y el Mínimo de Maunder. Es decir, que el enfriamiento se produjera como consecuencia de alguna otra causa y ambos fenómenos coincidieron casualmente en el tiempo. Por ejemplo, una actividad volcánica excepcionalmente elevada, que inundó la atmósfera de ceniza volcánica, la cual bloqueaba parte de la energía solar entrante, o quizás un debilitamiento de la Corriente del Golfo (hipótesis consistente con el hecho de que la Pequeña Edad de Hielo afectó sobre todo al hemisferio norte).

[2] Una segunda posible explicación es que la energía total emitida por el Sol por unidad de tiempo (su "luminosidad") disminuye un poco cuando no hay manchas. Aunque esto podría parecer una contradicción, pues las manchas bloquean la salida de parte de la luz solar allí donde se encuentran, este déficit causado por [i] el bloqueo parcial de la luz por las manchas podría ser compensado con creces por [ii] la emisión extra de las fáculas (fotosféricas) y de las *plages* y la red cromosférica. Los procesos físicos [i] y [ii] son distintos e independientes, y casi se cancelan entre sí, pero con una contribución superior de las fáculas, *plages* y red cromosférica a lo largo de un ciclo solar, de manera que una actividad magnética elevada (más manchas) significaría más emisión neta de energía por el Sol.

[3] Otra posibilidad sería que, como consecuencia de la desaparición de las manchas, hubiera una redistribución espectral de la energía solar: El Sol seguiría emitiendo la misma cantidad de energía durante un Gran Mínimo (como el de Maunder), pero con una distribución



espectral diferente. Las manchas solares son oscuras porque son más frías que la fotosfera circundante, pues estas -que son concentraciones de campo magnético intenso- inhiben parcialmente el transporte de energía por convección desde capas más profundas hasta la superficie visible del Sol. Ahora bien, la actividad magnética en la cromosfera y la corona solares está directamente ligada al campo magnético de las manchas y, a mayor campo magnético, más energía se emite en longitudes de onda más cortas que el visible (rayos X y, sobre todo, radiación ultravioleta). El Sol claramente emite más energía en la parte UV del espectro cuando hay más manchas solares. La totalidad de esta radiación de longitud de onda más corta que el visible es absorbida por la atmósfera terrestre, mientras que la luz visible tiene que pagar un peaje para llegar a la superficie: aproximadamente el 30% de la radiación visible incidente es reflejada de vuelta al espacio mediante el albedo planetario.

Por lo tanto, una redistribución espectral de la energía solar implicaría que, de

facto, hay más energía para calentar la atmósfera, aún sin variar la cantidad total de energía emitida por el Sol por segundo. [4] Una última explicación (y no exenta de polémica) se basaría en el efecto de los rayos cósmicos sobre el albedo planetario a través del incremento de la nubosidad. Con un campo magnético más débil en la heliosfera y la magnetosfera, los rayos cósmicos pueden penetrar más fácilmente. La heliosfera y la magnetosfera actúan como escudos de fuerza que protegen a la Tierra de la entrada de los superenergéticos rayos cósmicos, algunos de los cuales -que son básicamente protones y núcleos de helio acelerados a velocidades próximas a la de la luz- pueden llegar a tener una energía cinética comparable a la de una pelota de tenis a 150 kilómetros por hora. Al penetrar más rayos cósmicos en la atmósfera se produce mayor ionización (además de más carbono 14), lo que favorece la formación de nubes, cuya contribución neta al albedo es incrementarlo (y, en consecuencia, enfriar la atmósfera).

INCERTIDUMBRES

Hay dos grandes incertidumbres en relación con los Grandes Mínimos. Para empezar, no sabemos a ciencia cierta por qué ocurren; no existe aún una teoría satisfactoria que los explique. Desconocemos también si la ausencia prolongada de manchas solares podría estar relacionada con cambios climáticos en el pasado. Está bien establecido que el número de manchas solares se redujo notablemente entre 1645 y 1715, época

en la que casi dejó de haber auroras boreales. Sin embargo, sigue abierto el debate sobre si hubo una relación causa-efecto entre la casi ausencia de manchas y el enfriamiento de la atmósfera terrestre. He presentado cuatro posibles explicaciones, la primera de las cuales es simplemente una coincidencia temporal de dos episodios independientes (Mínimo de Maunder y Pequeña Edad de Hielo) y las otras tres -que no son mutuamente exclu-

yentes- están relacionadas con la energía emitida por el Sol o con el efecto de apantallamiento de los rayos cósmicos por la heliosfera y la magnetosfera terrestre. Posiblemente habrá que esperar a que ocurra el próximo Gran Mínimo para poder conocer la respuesta. Estos Grandes Mínimos son un fenómeno recurrente en la historia magnética del Sol (ha habido veintiséis Grandes Mínimos en los últimos nueve mil trescientos años), aunque no se conoce ninguna periodicidad en su aparición. Algunos científicos piensan que el próximo podría comenzar dentro de unas pocas décadas.

RECOMENDADOS

NAUKAS 2023. CICLO COMPLETO ONLINE



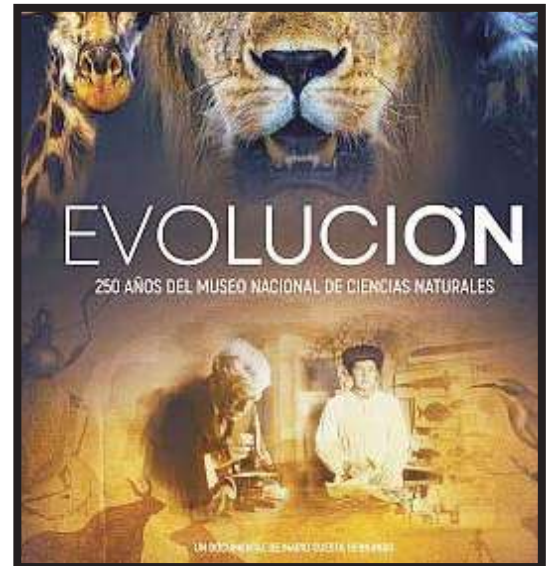
El evento de divulgación científica nacional de referencia, que tuvo lugar del 14 al 17 de septiembre de 2023, ha puesto a disposición del público todas las sesiones online. Las sesiones, de diez minutos, abarcan una enorme variedad de temas científicos: genética, lingüística, medicina forense, astronomía, química, matemáticas y un larguísimo etcétera.

<https://www.eitb.eus/es/tag/naukas-bilbao/>

EVOLUCIÓN. 250 AÑOS DEL MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS

El Museo Nacional de Ciencias Naturales acaba de cumplir 250 años, lo que lo convierte en uno de los museos de historia natural más antiguos del mundo. Para conmemorar el aniversario, han desarrollado el documental Evolución, disponible online.

La película da al espectador una completa imagen del MNCN. A través de conversaciones con personalidades del mundo de la cultura, el arte, la educación y, por supuesto, la ciencia, se revelan aspectos tan desconocidos como fundamentales de esta institución. El recorrido a lo largo de las salas y las colecciones del museo muestra los aspectos que han convertido a este centro de investigación en un referente del mundo de la ciencia, las colecciones de Historia Natural, la educación y la divulgación científica.



<https://www.rtve.es/play/videos/somos-documentales/evolucion-250-anos-del-museo-nacional-ciencias/6577500/>

CALENDARIO CIENTÍFICO ESCOLAR



El “Calendario Científico Escolar 2023” está dirigido principalmente al alumnado de educación primaria y secundaria obligatoria. Cada día se ha recogido un aniversario científico o tecnológico como, por ejemplo, nacimientos de personas de estos ámbitos o conmemoraciones de hallazgos destacables. El calendario y las guías están disponibles en abierto para descarga gratuita en la página web del IGM.

<https://eventociencia.es/calendario-cientifico-escolar/>