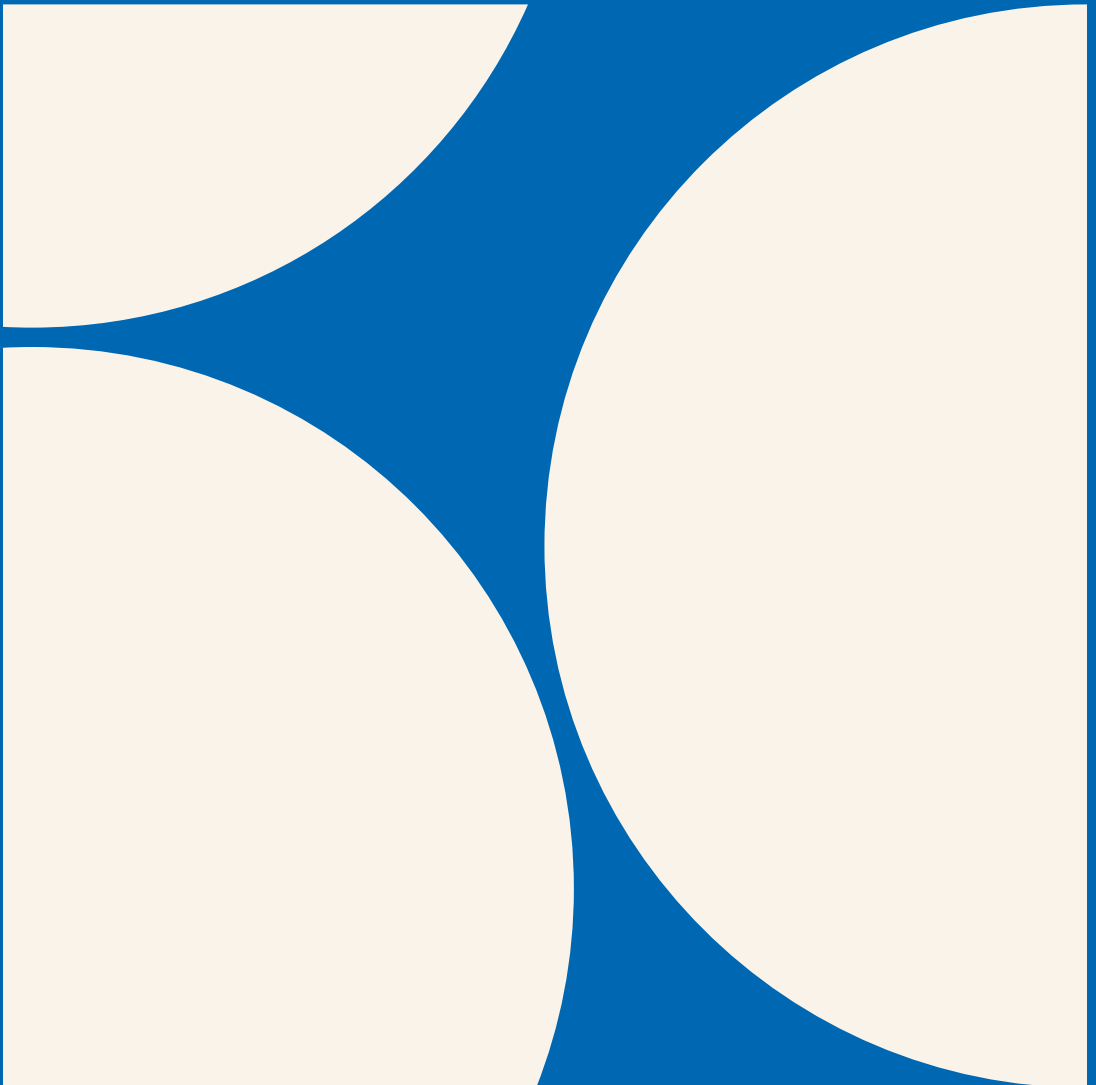


Instituto de
Astrofísica
de Andalucía

-
1975-2025



Agradecimientos:

Agradecemos a todo el personal del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) su dedicación y pasión, así como a las instituciones que han apoyado nuestra labor a lo largo de estos cincuenta años.

Instituto de Astrofísica de Andalucía - 1975-2025

Granada, 2025

Silbia López de Lacalle
Antxon Alberdi
Pablo Santos Sanz
Jesús Aceituno
Gilles Bergond
Miguel Abril
Emilio J. García Gómez-Caro
José María Quintana González
Emilio J. Alfaro
Pilar López de Coca
José Juan López Moreno
Isabel Márquez Pérez
José Manuel Vilchez Medina



INSTITUTO DE
ASTROFÍSICA DE
ANDALUCÍA



EXCELENCIA
SEVERO
OCHOA



CSIC

La versión electrónica de este libro está disponible en acceso abierto en editorial.csic.es y se distribuye bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-Non Comercial-No Derivadas 4.0. La información completa sobre dicha licencia puede ser consultada en <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>. Esta licencia afecta solo al material original del libro. El uso del material proveniente de otras fuentes (indicadas en las referencias), como diagramas, ilustraciones, fotografías o fragmentos de textos, requerirá permiso de los titulares del *copyright*.

Las noticias, los asertos y las opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor/a o autores/as. La editorial, por su parte, solo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

Cómo citar: *Instituto de Astrofísica de Andalucía. 1975-2025* / Silbia López de Lacalle, Antxon Alberdi, Pablo Santos Sanz, Jesús Aceituno, Gilles Bergond, Miguel Abril, Emilio J. García Gómez-Caro, José María Quintana González, Emilio J. Alfaro, Pilar López de Coca, José Juan López Moreno, Isabel Márquez Pérez, José Manuel Vilchez Medina. Granada: CSIC, 2025.

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es>

EDITORIAL CSIC: <https://editorial.csic.es> (correo: editorialcsic@csic.es)



© CSIC, 2025

© Silbia López de Lacalle, Antxon Alberdi, Pablo Santos Sanz, Jesús Aceituno, Gilles Bergond, Miguel Abril, Emilio J. García Gómez-Caro, José María Quintana González, Emilio J. Alfaro, Pilar López de Coca, José Juan López Moreno, Isabel Márquez Pérez, José Manuel Vilchez Medina

© De las imágenes, las fuentes mencionadas a pie de figura

ISBN: 978-84-00-11412-1

e-ISBN: 978-84-00-11413-8

NIPO: 155-25-060-0

e-NIPO: 155-25-061-6

Depósito legal: M-10358-2025

Idea y dirección de la edición: Silbia López de Lacalle Ramos

Corrección y coordinación editorial: Amanda López Moreno, Enrique Barba (Editorial CSIC) y María José Pérez Sánchez

Diseño y maquetación: Colectivo Verbena

Impresión y encuadernación: Anzos, S. L.

Impreso en España. *Printed in Spain*

En esta edición se ha utilizado papel ecológico sometido a un proceso de blanqueado ECF, cuya fibra procede de bosques gestionados de forma sostenible.

Prólogo	009
---------	-----

CINCO DÉCADAS, UN UNIVERSO ENTERO
Y 13800 MILLONES DE AÑOS

A. SISTEMA SOLAR	019
------------------	-----

B. ESTRELLAS	047
--------------	-----

C. EL MEDIO INTERESTELAR Y EL NACIMIENTO DE LAS ESTRELLAS	069
--	-----

D. EL MEDIO INTERESTELAR Y LA MUERTE DE LAS ESTRELLAS	081
--	-----

E. LAS GALAXIAS	105
-----------------	-----

F. INFINIDAD DE GALAXIAS	121
--------------------------	-----

G. COSMOLOGÍA	137
---------------	-----

Historia del IAA	148
------------------	-----

Cómo hemos cambiado	152
---------------------	-----

Unidad de Desarrollo Instrumental y Tecnológico (UDIT)	162
---	-----

Observatorios	168
---------------	-----

Divulgación	176
-------------	-----

Excelencia Severo Ochoa	180
-------------------------	-----

Epílogo	182
---------	-----

Es un honor prologar este volumen que conmemora los 50 años de trayectoria del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), uno de nuestros institutos del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

La década de los setenta del siglo XX puede identificarse como el momento en el que comienza el auge de la astronomía moderna en España. La excelente calidad del cielo de algunos emplazamientos en territorio peninsular, entre ellos Sierra Nevada en Granada y la sierra de los Filabres en Almería, colocaron a nuestro país en una situación de privilegio, aun cuando las actividades astronómicas en España eran muy precarias por entonces. En este contexto, el CSIC decidió potenciar sus actividades en astrofísica y crear el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA). La existencia de un pequeño grupo de investigación en la Universidad de Granada contribuyó también a ello. El CSIC dotó al IAA de instalaciones telescópicas propias y así nació en 1981 el Observatorio de Sierra Nevada (OSN), que realizó sus primeras observaciones en 1982. Ya en el siglo XXI, el CSIC se incorporó al Observatorio de Calar Alto, cuyo instituto de referencia científico es el propio IAA.

Desde su creación en 1975, el IAA no ha parado de crecer y progresar. Es un centro de referencia nacional e internacional en investigación en astrofísica y ciencias del espacio. Se trata de uno de los mayores, más prestigiosos y brillantes centros de investigación del CSIC. Sus más de 250 integrantes consiguieron por primera vez en 2018 el distintivo de excelencia que otorga el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, reconocimiento que ha conseguido revalidar en 2022 y que estará en vigor hasta 2027. El IAA produce ciencia excelente, desarrolla instrumentación de vanguardia, capta talento investigador y los recursos necesarios para abordar su investigación de frontera. También debe destacarse su participación en las grandes infraestructuras astronómicas internacionales actualmente en desarrollo, así como su contacto permanente con la sociedad, a través de su excelente equipo de comunicación.

Desde el CSIC miramos con orgullo al IAA: un instituto de vanguardia, ambicioso, que ha sido protagonista en los grandes descubrimientos de la astrofísica mundial. Un instituto con alma y con un capital humano que transmite profesionalidad e ilusión por el trabajo que realiza.

¡Enhorabuena IAA!

Eloísa del Pino

Presidenta del Consejo Superior de Investigaciones Científicas



Queridos y queridas colegas, amigos y apasionados de la astrofísica:

Al celebrar el 50.º aniversario del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), me siento profundamente honrado y orgulloso de compartir este momento con todos ustedes. Esta publicación refleja el enorme trabajo que hemos realizado a lo largo de estos años, pero además simboliza el compromiso y la pasión de, al menos, un par de generaciones de investigadores e investigadoras, técnicos y personal de gestión que han hecho posible que nuestro centro se convierta en un referente en el campo de la astrofísica a nivel nacional e internacional. Esta publicación supone, además, un legado que dejamos a la sociedad como celebración de nuestro aniversario, marcando un hito en nuestra trayectoria institucional.

Desde nuestra fundación en 1975, con las primeras observaciones desde el Observatorio de Sierra Nevada (OSN) en 1982, el IAA ha crecido de manera exponencial. Comenzamos con el germen de un pequeño grupo de visionarios entusiasmados con la idea de escudriñar el universo. Hoy, somos una comunidad vibrante de más de 260 personas que trabajan incansablemente para desentrañar los secretos del cosmos. A lo largo de estos años, hemos realizado contribuciones muy relevantes en diversas áreas de investigación. También hemos desarrollado instrumentación tanto para el espacio como para los telescopios en tierra, especialmente diseñados para resolver los problemas astrofísicos a los que nos enfrentamos. Nuestros trabajos no solo han ampliado nuestro entendimiento del universo, sino que también han inspirado a las nuevas generaciones de personal científico y técnico.

Es importante recordar que la investigación en astrofísica supone un esfuerzo colaborativo donde la curiosidad, la inteligencia y la ilusión son ingredientes necesarios. Quiero aprovechar este escrito para rendir homenaje a quienes han formado parte de nuestra institución. Su dedicación y creatividad han sido el motor que ha impulsado nuestro éxito. Estoy agradecido por el trabajo colectivo que todas estas personas han realizado, desde las más jóvenes que se inician en la investigación hasta los científicos y científicas sénior que han guiado nuestras investigaciones con su liderazgo, experiencia y sabiduría. También agradezco a nuestra casa madre, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), así como a las instituciones que han colaborado con nosotros a lo largo de estos años. Vuestras aportaciones han enriquecido nuestras investigaciones y extendido el impacto que hemos ejercido en la comunidad científica global.

Durante los últimos cincuenta años, hemos presenciado desarrollos tecnológicos asombrosos que han revolucionado la astrofísica. La llegada de telescopios más potentes, tanto en tierra como en el espacio, ha permitido observar fenómenos que antes eran inalcanzables. Considero fundamental mantenernos a la vanguardia de estos avances tecnológicos y seguir incorporando herramientas innovadoras en nuestra investigación. Con la puesta en marcha de nuevos telescopios cada vez más sensibles y la disponibilidad de telescopios espaciales, nuestro futuro se presenta lleno de oportunidades. También la mejora de las herramientas de análisis, con la utilización de la computación intensiva y la inteligencia artificial, nos permiten analizar, modelar e interpretar nuestros resultados de una manera que no podíamos prever hace tan solo unos años. Un futuro apasionante para las nuevas generaciones.

Quienes hemos pasado por el IAA compartimos la pasión por la ciencia y una enorme curiosidad por nuestro universo. Las preguntas que nos hacemos no solo son de índole científica, sino que también tienen implicaciones filosóficas y culturales. La ciencia nos invita a reflexionar sobre nuestro lugar en el universo y sobre la naturaleza de la existencia. A través de nuestras investigaciones, no solo buscamos respuestas, sino también un valor de conexión con todo lo que nos rodea. En este sentido, no podemos pasar por alto la importancia de la educación, la difusión de nuestros resultados y la divulgación. Nuestra labor no termina en la investigación; también es nuestra responsabilidad transmitir nuestro conocimiento a la sociedad. A lo largo de los años, hemos desarrollado programas educativos y actividades de divulgación en múltiples formatos que han permitido que miles de personas se adentren en el fascinante mundo de la astrofísica. La curiosidad y la pasión por el conocimiento no deben ser exclusivas de los científicos; toda la ciudadanía debe tener la oportunidad de disfrutar de las maravillas del cosmos.

Mirando hacia el futuro, estoy convencido de que el IAA continuará liderando la investigación en astrofísica y desempeñará un papel crucial en la exploración del universo. En estos cincuenta años, hemos llevado a cabo exploraciones desde el Sol a los confines del Sistema Solar, con una activa participación en las misiones espaciales de la Agencia Espacial Europea; gracias a liderar el desarrollo del instrumento CARMENES, ubicado en Calar Alto, hemos pasado del descubrimiento del primer exoplaneta, 51 Pegasi b, en 1995, al de miles de exoplanetas, algunos de ellos en zonas de habitabilidad de muchas estrellas; hemos sido capaces de estudiar mil millones de cuerpos celestes con el satélite Gaia, realizando un cartografiado en ocho di-

mensiones de nuestra galaxia; hemos pasado del estudio de los cuásares, fuentes extremadamente compactas y muy luminosas situadas a grandes distancias, a obtener la primera imagen directa de un agujero negro; hemos pasado de utilizar la luz como nuestro principal elemento de estudio a un nuevo mensajero cósmico, las ondas gravitacionales; hemos pasado de analizar algunas galaxias al cartografiado de grandes muestras, que nos permiten estudiar la física del universo acelerado. Pero aún así, nos queda por responder cuestiones fundamentales: ¿cómo se formaron las primeras estrellas? ¿Hay evidencias de vida en el universo? ¿Cómo se forman y evolucionan las galaxias? ¿Qué podemos aprender sobre el origen y destino del universo a través del estudio de grandes muestreos de galaxias? ¿Cuál es la naturaleza de la energía oscura? Estos interrogantes nos motivan y nos impulsan a seguir explorando, ¡hasta el infinito y más allá!

Por último, quiero invitarles a unirse a la comunidad IAA en este emocionante viaje. Nuestro legado se construye no solo con los logros del pasado, sino con la visión y la dedicación que tenemos por delante. Espero que esta celebración del 50.º aniversario del IAA sirva como un recordatorio de nuestra historia, de lo lejos que hemos llegado y de lo que aún podemos lograr juntos. A quienes han sido parte de esta historia, gracias por su contribución y su apasionada dedicación.

Todavía nos queda mucho por hacer, porque la investigación científica, por su propia naturaleza, necesita estar reactivándose continuamente. Afrontaremos lo que está por venir con un profundo entusiasmo.

Con entusiasmo por lo que está por venir,

Dr. Antxon Alberdi

Director del Instituto de Astrofísica de Andalucía

Cinco décadas, un universo entero
y 13800 millones de años

Silbia López de Lacalle Ramos

Permitidme, antes de comenzar, que os hable de los magnetares. Se trata de un tipo de estrellas de neutrones —objetos muy densos que resultan de la muerte de estrellas masivas— que, en ocasiones, sufren enérgicas erupciones. En 1979, tras el hallazgo del primer magnetar, se propuso la siguiente explicación para su fugaz y violenta actividad: con un campo magnético muy intenso y una altísima velocidad de rotación, sus líneas de campo magnético se moverán a través de la rígida corteza de la estrella, que se deformará y, eventualmente, se agrietará en un poderoso «terremoto» estelar. Tras el terremoto, el campo magnético se asentará en una configuración más estable y la estrella continuará, tan tranquila, su vida.

Algo así ha ocurrido durante la elaboración de este texto.

A lo largo de las siguientes páginas voy a contaros, por un lado, cinco décadas de un centro de investigación, y, por otro, un universo entero, con sus planetas, cometas, nubes de gas, estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias... Hablaremos incluso de objetos que no brillan, como los agujeros negros o la materia oscura, y de épocas presentes y pasadas.

Un propósito ambicioso que, en una primera fase, pareció inalcanzable. El universo está más o menos ordenado, desde el IAA llevamos décadas contándolo, pero ¿cómo resumir cientos de artículos publicados a lo largo de cincuenta años, líneas de investigación nuevas y antiguas? Incluso limitándonos a investigaciones en revistas de alto impacto o a aquellas con una alta participación por nuestra parte, el listado era abrumador. Esa fue, siguiendo la analogía con el magnetar, la fase de terremoto: desorden, exceso, piezas que no encajaban y, por qué no confesarlo, un poco de desánimo.

Pero, poco a poco, los cuerpos celestes han ido ordenándose. Unas ideas han llamado a otras y, de repente, todo había encontrado su sitio. Llegó el feliz momento en el que los relatos encajaban ordenados, como las líneas de campo magnético de un magnetar tras desperezarse. O como cuando los planetas, asteroides y cometas se ordenaron en órbitas alrededor del Sol, después de los turbulentos tiempos de la nebulosa solar. Una reordenación que ha tomado un cariz amable, como de hilos de seda que conectan, suavemente, una línea de puntos imaginaria en el universo.

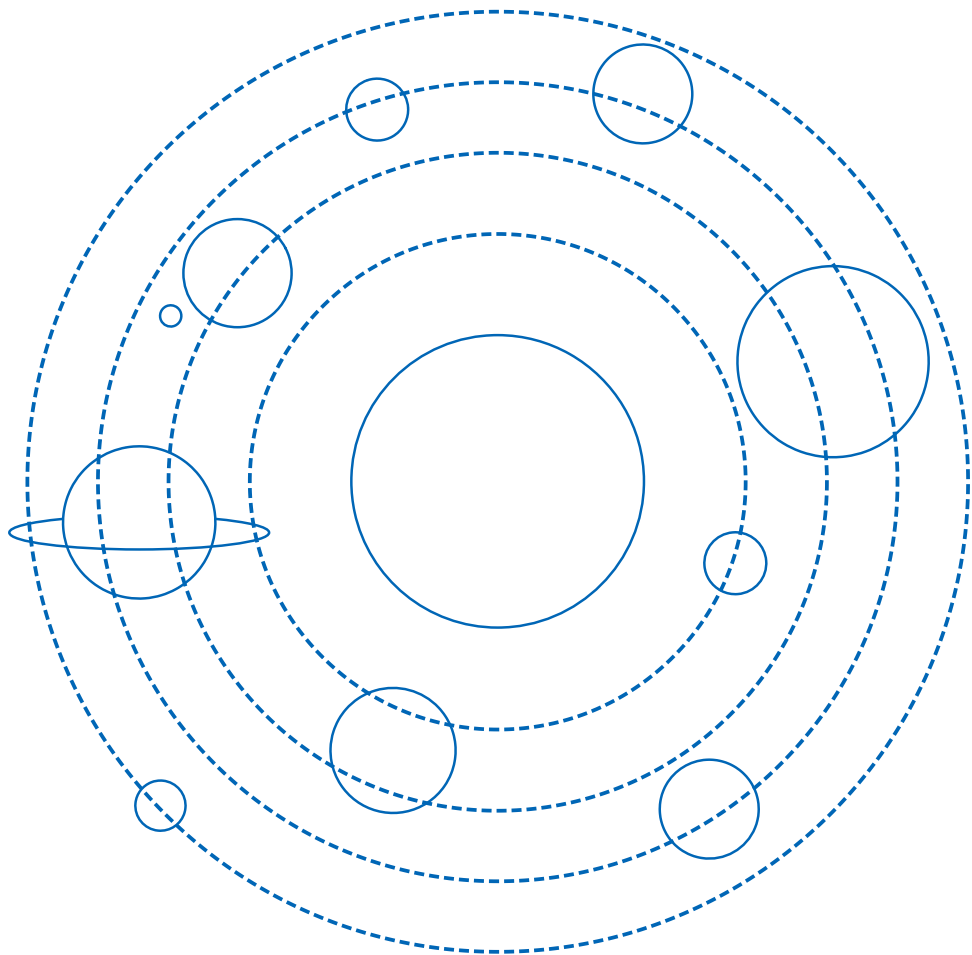
De modo que no usaré expresiones como «abróchense el cinturón». Será un paseo apacible, desde lo más cercano y familiar, el Sistema Solar, hacia las estrellas lejanas y hasta las galaxias del principio de los tiempos. Será como caminar por el campo, pero con una miriada de objetos que emiten o reflejan luz, que interaccionan entre sí y evolucionan. Que a veces estallan y después continúan serenos.

A lo largo de este paseo lidiaremos con dos conceptos fundamentales, distancia y luz. Nos olvidaremos del kilómetro, tan útil en tierra, y lo cambiaremos por el año luz, o la distancia que recorre la luz en un año. La luz, nuestra principal fuente de información, mostrará su abanico completo: veremos, en rayos X y gamma, objetos muy energéticos, como las supernovas; en el infrarrojo observaremos regiones frías, como las nubes donde nacen las estrellas; por su parte, las observaciones en radio, que detectan electrones moviéndose en campos magnéticos, nos ofrecerán increíbles panorámicas, como los chorros que expulsan los agujeros negros supermasivos.

Comenzamos, pues, nuestro paseo sosegado. Un itinerario del que, según avancemos, emergerá una idea clara. Una idea que, sin duda, apreciaréis a lo largo del relato y que retomaré al final.

A.

**SISTEMA
SOLAR**



El Sistema Solar representa una peculiar mezcla de cuerpos. Tenemos una estrella, el Sol, que aglutina más del 99 % de la masa total del sistema, cuatro planetas rocosos de tamaño más bien pequeño (Mercurio, Venus, Tierra y Marte), otros cuatro planetas gaseosos gigantes (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno), varios planetas enanos confirmados (Plutón entre ellos), cientos de miles de asteroides, más de seis mil cometas identificados y más de tres mil objetos helados situados más allá de Neptuno.

Constituye, no obstante, un vecindario bastante conocido: sabemos que el Sistema Solar se formó hace unos 4600 millones de años a partir de una única nube de gas y polvo, que comenzó a concentrarse y a rotar hasta aplanarse en forma de disco en cuyo centro, la región más densa y caliente, nació el Sol. A su alrededor se crearon pequeños grumos de gas y polvo, los llamados planetesimales, que poco a poco acumularon suficiente materia para convertirse en planetas, rocosos en las regiones internas y cálidas, y gaseosos en las regiones externas y frías. Encontramos un ejemplo de este proceso en lo que hoy conocemos como cinturón de asteroides, un conjunto de cuerpos rocosos situados entre Marte y Júpiter que constituyen los restos de un planeta que no llegó a formarse debido a la fuerza gravitatoria de Júpiter. También quedaron algunos «escombros» en las regiones más externas del Sistema, que forman el cinturón de objetos transneptunianos (o cinturón de Kuiper), y, mucho más lejos, en la nube de Oort, una burbuja que rodea todo el Sistema Solar y que puede contener millones de cometas.

LA ATMÓSFERA DEL PLANETA AFORTUNADO

La aventura espacial del IAA, que nos ha llevado hasta Mercurio, a Marte o a cabalgar a lomos de un cometa, comenzó en 1981 con el lanzamiento, desde El Arenosillo (Huelva), de dos cohetes para el estudio de la atmósfera terrestre. De modo que resulta hermoso que nuestro relato comience aquí, en esa envoltura gaseosa que se extiende desde el suelo hasta los diez mil kilómetros, que nos protege de los meteoritos y de la radiación dañina y que, a grandes rasgos, permite que la vida prospere en el planeta.

Sabemos desde hace décadas que la atmósfera no es una capa de gases inerte, sino que se trata de un sistema altamente acoplado, donde lo que ocurre en regiones altas puede influir en las bajas. Los modelos climáticos, tan necesarios en el contexto actual de calentamiento global, deben, por lo tanto, considerar todos los factores que intervienen en el estado de la atmósfera, entre los que se encuentra la actividad solar: el Sol muestra un ciclo de once años a lo largo del que su actividad aumenta y disminuye, y que produce cambios en la cantidad de energía que emite (y que, por lo tanto, recibe nuestro planeta).

Por ejemplo, en 2017 coordinábamos un estudio que mostraba que, de hecho, la influencia de la actividad solar sobre la atmósfera es mayor de lo que pensábamos, especialmente en la estratosfera. El conjunto de datos producido, que incluía los efectos de las partículas y una nueva estimación de la cantidad de radiación promedio del Sol, constituía la mejor evaluación posible de la variabilidad solar pasada, presente y futura.

Para aportar precisión y detalle a nuestro conocimiento, aún incompleto, de los fenómenos atmosféricos, en el IAA trabajamos con datos de misiones, como TIMED (NASA) o ENVISAT (ESA), así como con instrumentación en tierra. Gracias a ENVISAT, por ejemplo, en 2020 detectábamos una estratopausa elevada, un fenómeno que ilustra el carácter conectado de esos miles de kilómetros de aire y que señalaba también lagunas en nuestro conocimiento: se trata de un fenómeno invernal, pero se detectó en otoño.

La estratopausa es una región límite, que establece la división entre la estratosfera, donde la temperatura del aire asciende con la altura, y la mesosfera, en la que ocurre lo contrario, y que suele situarse a unos 50-55 kilómetros de altura. Pero, en ocasiones, la intensificación de las ondas generadas en la superficie del planeta produce un calentamiento súbito de la estratosfera, que la eleva hasta los 85 kilómetros, algo que ocurre en invierno y en latitudes polares. El hallazgo en otoño constituía un evento único que podría apuntar al cambio climático (sabemos que este afecta a la variabilidad de las ondas planetarias originadas en la superficie), y que permitía entender mejor el funcionamiento de la atmósfera: por ejemplo, las estratopausas elevadas afectan al transporte de aire y conducen a una mayor destrucción del ozono estratosférico, que absorbe la radiación dañina del Sol.

Como vemos, el estudio de la atmósfera requiere un enfoque global y amplio, que incluye factores cuya influencia desconocemos aún, entre ellos la formación de nuevas partículas. Porque la atmósfera no solo es gas: incluye también aerosoles, o partículas suspendidas líquidas — como gotas de agua— o sólidas, como ceniza volcánica, arena o pólenes.

Partículas que añaden otro actor en el ciclo atmosférico: el océano. En 2020 encabezábamos una investigación para esbozar el mecanismo que conecta las emisiones oceánicas de compuestos de yodo y la formación de partículas yodadas. El estudio mostraba cómo se produce la conversión de gas a partícula, un mecanismo hasta entonces desconocido y no contemplado en los modelos, pero sin duda relevante: la emisión global de yodo a la atmósfera se ha triplicado en los últimos setenta años debido a la actividad humana, y se espera que este incremento continúe.

La crisis climática es uno de los factores que muestran cómo la actividad humana afecta globalmente al planeta, pero existen otros, como la contaminación lumínica, que apenas empezamos a comprender. Producida por un exceso de iluminación nocturna o una iluminación incorrecta, los efectos de la contaminación lumínica sobre las observaciones astronómicas se conocen desde mediados del siglo pasado, pero a principios de este siglo se documentaron sus riesgos para los ecosistemas y para la salud humana debido a la modificación de los ciclos de día y noche: la mitad de Europa sufre una pérdida de la noche generalizada.

El IAA ha participado en estudios pioneros que analizaban la evolución y los efectos de la contaminación lumínica y que mostraron, en 2017 y 2018 respectivamente, que las superficies iluminadas en el planeta crecen de media más de un 2 % al año —a pesar de la introducción de sistemas de iluminación más eficientes—, y que la exposición a la luz azul durante la noche produce un mayor riesgo de padecer cáncer de mama y próstata. Este ámbito de estudio vino acompañado de la creación de la Oficina de Calidad del Cielo del IAA, para defender el cielo oscuro como recurso científico, cultural y medioambiental.

Otro factor que influye en la atmósfera y cuya magnitud global, de nuevo, aún desconocemos es la electricidad, tanto en el caso de fenómenos conocidos, como los rayos, como en fenómenos cuya existencia, hace pocas décadas, ignorábamos.

Hace ya tres siglos se descubrió la naturaleza eléctrica de los rayos y, aunque sabemos que afectan a la composición de la atmósfera, constituyen uno de los fenómenos menos conocidos de las ciencias planetarias. Se estima que, cada segundo, se producen unos cincuenta relámpagos y, en su descenso, avanzan en una serie de saltos discontinuos cuyo origen se ignora. Tampoco se comprende por qué, al propagarse, los rayos emiten pulsos de muy alta energía, o qué es lo que produce un fenómeno conocido como destellos terrestres de rayos gamma, relacionados con las tormentas eléctricas. La instrumentación actual no permite resolver las escalas espaciales necesarias para investigar estos procesos, pero el proyecto *eLightning* (H2020), coordinado por el IAA, emplea técnicas computacionales avanzadas para desvelar, con el detalle de un microscopio, los procesos físicos involucrados en el avance de un rayo.

Los rayos son la principal causa de incendios naturales en el mundo. Se propagan en función de las condiciones meteorológicas y del combustible disponible, liberando a la atmósfera cantidades considerables de carbono, óxidos de nitrógeno y otros gases que intervienen en la crisis climática. Distintos estudios han sugerido que la frecuencia y distribución de los rayos puede cambiar en el futuro, y en 2023 dirigíamos un estudio que mostraba un aumento, antes de fin de siglo, de más del 40 % en los rayos totales, lo que apuntaba a su vez a un gran incremento de los incendios forestales en la cuenca mediterránea.

Y, aunque los rayos constituyen uno de los fenómenos más conocidos de la electricidad atmosférica, no se trata del único. Gracias a datos de ASIM, un instrumento que opera desde la Estación Espacial Internacional y en el que el IAA participa, pudimos confirmar en 2020 la existencia de un gemelo frío de los rayos: se trata de un tipo de descarga eléctrica dentro de las nubes, que produce destellos azules y emisiones pulsadas en radio, pero que, al contrario que los rayos, no calienta el aire a su alrededor.

Este tipo de descargas muestran un gran desequilibrio térmico, de hasta decenas de miles de grados, entre la temperatura del aire ambiental y la de los electrones dentro del filamento de plasma (o gas ionizado), y activan reacciones químicas que producen óxido nitroso, un compuesto con un potencial de calentamiento global unas trescientas veces superior al del dióxido de carbono y que tiende a eliminar el ozono atmosférico. Así, su cuantificación precisa y el conocimiento de sus fuentes y sumideros en la atmósfera resulta fundamental, de modo que debemos prestar atención, también, a esas descargas azules frías.

Otro de los fenómenos eléctricos hallados recientemente en la atmósfera remite a la mesosfera, una región situada kilómetros por encima de las nubes y que se creía carente de actividad, pero donde se ha documentado toda una familia de eventos eléctricos relacionados con los rayos de tormenta. Conocidos como eventos luminosos transitorios (o TLEs, por sus siglas en inglés), su carácter esquivo propició que recibieran nombres extraídos de *Sueño de una noche de verano* de Shakespeare, como duendes o elfos. Se sabe que también influyen sobre la composición química de la atmósfera, pero aún presentan muchas incógnitas. Tantas que desde el IAA tuvimos la oportunidad de realizar el primer estudio espectroscópico de uno de ellos: los fantasmas, o GHOSTs, del inglés *GreenishH Optical emission from Sprite Tops*.



Un duende (o *sprite*)
fotografiado sobre cielos
franceses en 2024. Extraída
de la web del proyecto
de ciencia ciudadana
"Spritacular".
Crédito: @Nicolas Escurat,
16 de agosto de 2024

Los fantasmas no aparecen de forma aislada, sino que se observan en la región superior de los duendes (*sprites*), un espectacular evento de apenas centésimas de segundo que presenta una parte superior difusa y una región inferior poblada de «tentáculos» (filamentos de aire ionizado). Los duendes pueden extenderse desde los cuarenta hasta los casi cien kilómetros sobre el suelo y, en ocasiones, presentan un fantasma verdoso sobre la parte superior difusa, que perdura cientos de milisegundos tras la desaparición del duende que lo generó.

Hasta ahora, la principal hipótesis para explicar este destello verdoso apuntaba a la interacción de las partículas cargadas (iones) con el oxígeno atómico presente en la atmósfera, un fenómeno ya identificado en el color verdoso de las auroras. Nuestro estudio halló, en cambio, que el destello verdoso se debe sobre todo a metales, hierro y níquel, un hallazgo que exigía una actualización de los modelos para los TLEs, cuya comprensión resulta a su vez esencial para entender el circuito eléctrico global del planeta.

DE PLANETAS Y SATÉLITES

El estudio de nuestra atmósfera nos lleva, de manera natural, a las atmósferas de los planetas del Sistema Solar, o incluso a la de satélites de otros planetas. O, aún más, a sus superficies, montañas y valles.

Dada su proximidad, en el IAA abordamos el estudio de este complejo vecindario de diversas formas: hemos participado, por ejemplo, en *Mars Express* y *Venus Express*, misiones espaciales de la Agencia Espacial Europea (ESA) que han sobrevolado Marte y Venus respectivamente; en *Cassini-Huygens* (NASA/ESA) que, además de sobrevolar Saturno, liberó un módulo que descendió sobre la superficie de Titán, una de sus lunas; y en *Rosetta*, una misión pionera al acompañar al cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko en su viaje hacia las regiones internas del Sistema Solar.

Hemos participado en ellas tanto en la parte técnica como en el aprovechamiento científico de los datos, y el futuro depara excitantes novedades con las misiones *BepiColombo* y *ExoMars*, que despegaban camino a Mercurio y Marte en 2016 y 2018 respectivamente con instrumentación desarrollada en nuestras instalaciones. En el caso de *BepiColombo* (ESA/JAXA), que estudiará la composición, geofísica, magnetosfera e incluso la historia de Mercurio, uno de los planetas menos explorados del Sistema Solar, la contribución del IAA se ha centrado en el altímetro láser BeLA, mientras que en el de *ExoMars* hemos participado en el desarrollo de NOMAD, una pieza clave del orbital de la misión específicamente diseñada para estudiar el metano, un gas que en la Tierra producen sobre todo los seres vivos y cuyo hallazgo en Marte supuso una sorpresa en 2004.

En un futuro algo más lejano llegaremos a las lunas heladas de Júpiter: el IAA es la única institución española que contribuye tecnológica y científicamente a la misión JUICE (*Jupiter ICy moons Explorer*, ESA), que partió en 2023 rumbo a Júpiter para estudiar tanto el planeta como sus principales satélites, y para analizar las posibilidades del desarrollo de la vida alrededor de los planetas gigantes gaseosos.

Ahora, ¿qué nos han revelado esas misiones, así como los datos que recogemos con instrumentación en tierra? Mucho, de modo que aquí debemos ir por fascículos: comenzaremos por los planetas internos y nos iremos alejando hacia las regiones gélidas del Sistema Solar... hasta escapar de él.

Empezamos por Venus, nuestro vecino más próximo. Hasta los años sesenta del siglo pasado, Venus se consideró un gemelo de la Tierra debido a su parecido en tamaño, densidad y masa. Sin embargo, este planeta permanentemente cubierto de nubes se ha revelado como un verdadero rompecabezas, que las misiones espaciales y la mejora de los modelos numéricos están contribuyendo a resolver. El IAA, por ejemplo, participó en la misión *Venus Express* (2005), a través de la colaboración en el desarrollo del instrumento VIRTIS, que ofreció importantes datos sobre su compleja atmósfera, dominada por un descontrolado efecto invernadero y por vientos que giran sesenta veces más rápido que el planeta. VIRTIS estudió la inexplorada alta atmósfera de Venus, clave para comprender el escape de gases al espacio y, por tanto, su evolución y diferencias con la atmósfera de la Tierra.

Venus gira muy lentamente sobre sí mismo, tanto que un día dura allí 243 días terrestres. Pero su atmósfera, que debería rotar despacio también, circunda el planeta en apenas cuatro días, lo que indica que en la alta atmósfera de Venus soplan vientos que pueden superar los trescientos kilómetros por hora y cuya existencia aún no ha sido explicada de forma eficaz. Lo que sí se ha explicado es el motivo de las altas temperaturas del planeta, que no se deben a su menor distancia al Sol, sino al efecto invernadero producido por su densa atmósfera.

En 2014 encabezamos el estudio y descripción en detalle de las ondas atmosféricas del planeta, elementos clave para comprender la superrotación de la atmósfera, y en 2015 resolvíamos un misterio de más de medio siglo. Observada en el ultravioleta, la densa capa de nubes de Venus muestra una estructura oscura que abarca casi todo el disco del planeta y presenta forma de Y, cuya forma y evolución resultaban inexplicables. El trabajo describió el mecanismo que la sustenta e incluso logró reproducir, por primera vez, su evolución a lo largo de un mes.

Al contrario que Venus, con su efecto invernadero descontrolado, su densa atmósfera y sus 480 grados de temperatura en superficie (calor suficiente para fundir el plomo), en Marte encontramos un desierto frío con una atmósfera tenue.

Aunque, a día de hoy, debido a la temperatura y presión marcianas, el agua líquida es inestable y se encuentra o bien en estado sólido, o bien gaseoso, existen indicios de un pasado con condiciones más benévolas: antiguos ríos, deltas, afluentes o lagos marcianos, cuya edad se estima en unos 4000 millones de años, indican que el planeta debió de ser relativamente cálido a lo largo de sus primeros quinientos millones de años. En ese intervalo de tiempo, una atmósfera más espesa que la actual debió generar el efecto invernadero necesario para mantener temperaturas superiores a cero grados y permitir el flujo de agua líquida por la superficie.

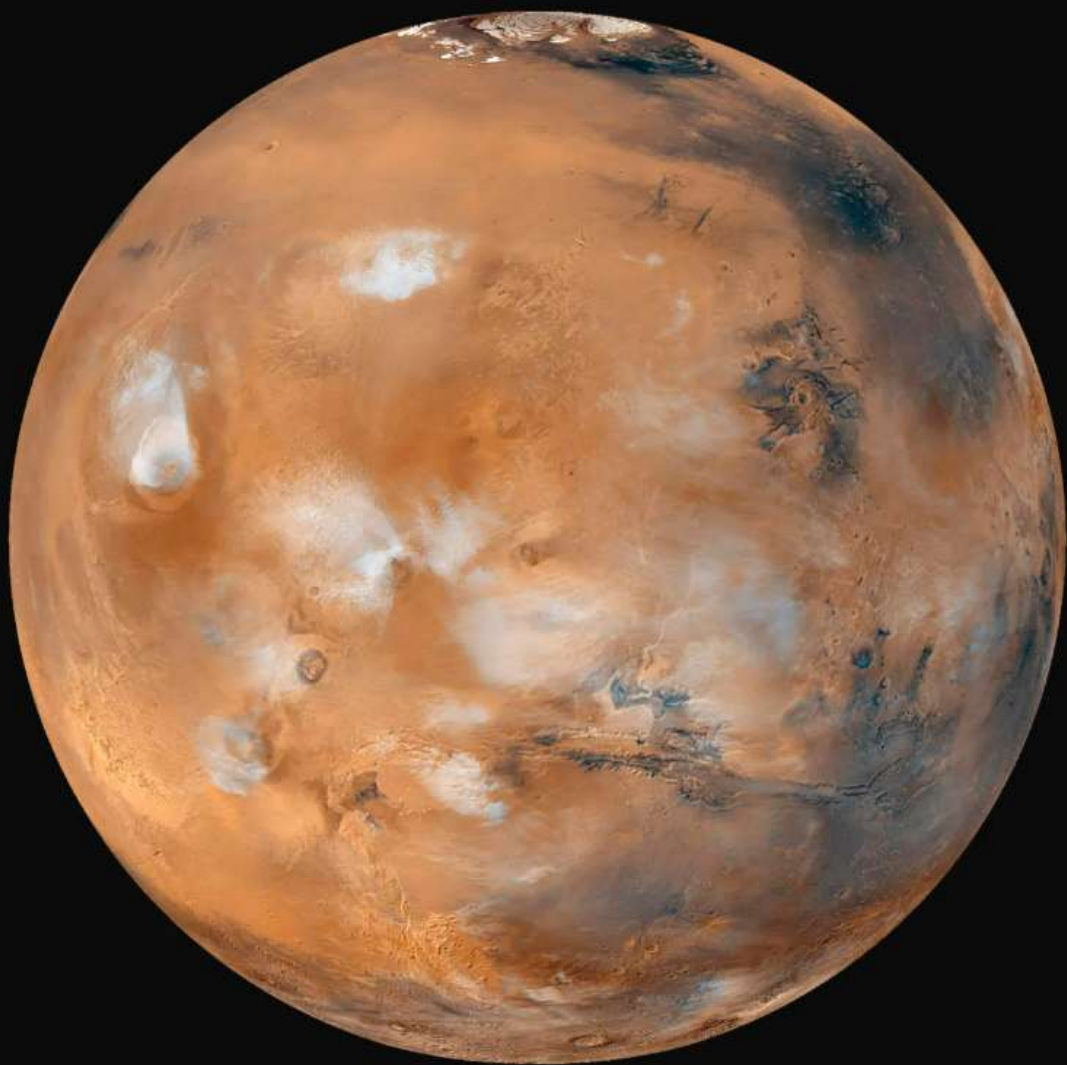
El IAA cuenta con una larga trayectoria en el estudio del planeta rojo, con participación en misiones como *Mars Express* (ESA) y *ExoMars* (ESA-Roscosmos), que abren y cierran un curioso círculo. Fue *Mars Express* quien aportó, en 2004, una de las primeras medidas de metano en Marte, un excitante hallazgo dado que podía constituir una señal de la existencia de vida —en la Tierra el 95 % del metano de la atmósfera proviene de procesos biológicos—, o de procesos geológicos activos.

Medidas posteriores, muy esporádicas en tiempo y en ubicación y con frecuencia muy cerca de los límites de detección de los instrumentos, dotaron de solidez al misterio “del metano” en Marte. Unas medidas que fueron desmentidas por NOMAD, un instrumento a bordo de *TGO-ExoMars* en cuyo desarrollo participó el IAA y que dio carpetazo al misterio: aportó un modesto límite superior que sugería una ausencia global de metano en la atmósfera marciana.

NOMAD ha contribuido enormemente a nuestro conocimiento del planeta rojo: reveló la relación entre las tormentas de polvo y el vapor de agua atmosférico y detectó, por primera vez, la emisión diurna del oxígeno atmosférico en una atmósfera distinta a la de la Tierra (conocida como línea verde, esta emisión ofrece información sobre la composición y dinámica de la atmósfera). También halló un compuesto nunca detectado en su atmósfera, el cloruro de hidrógeno, que representa un ciclo químico nuevo que debemos comprender; y cuantificó la pérdida de agua que se produce en la actualidad en el planeta, que constituye un paso importantísimo para entender la evolución de la atmósfera de Marte, desde una atmósfera más densa y con una mayor cantidad de agua hasta la débil atmósfera que presenta en la actualidad.

Nuestros estudios sobre Marte confluyeron en el proyecto europeo UPWARDS (2015-2018), que desarrolló nuevas técnicas matemáticas para extraer más información de los datos disponibles y que permitían, por ejemplo, combinar datos de instrumentos y misiones diferentes. En el marco del proyecto se obtuvieron los perfiles verticales de vapor de agua (un gas muy escaso en Marte, pero de gran importancia) y de dióxido de carbono (el gas más abundante en el planeta), unos resultados imposibles cinco años antes. El proyecto también se adentró en las tormentas de polvo, al hallar y cuantificar por primera vez una anticorrelación entre la cantidad de polvo y la de vapor de agua atmosféricos dentro de la tormenta. Además, se confeccionó un mapa completo de la distribución y del ciclo anual de las nubes de hielo de agua, que señala el importante papel de estas nubes sobre el ciclo anual del agua.

Antes de abandonar el planeta rojo, un último y hermoso apunte: en Marte nieva mucho. Sabíamos que allí, como en la Tierra, hay estaciones, y que en otoño e invierno las temperaturas en sus regiones polares descienden por debajo del punto de congelación del dióxido de carbono (125 grados bajo cero). Este dióxido de carbono puede depositarse en la superficie del planeta, bien precipitando en forma de nieve o condensando directamente en forma de escarcha, y en 2024 el IAA dirigía un estudio con un enfoque innovador: conseguía relacionar inequívocamente, en imágenes de misiones de una región helada del polo norte, la longitud de la sombra de los bloques de hielo con su altura. Esto permitió estimar con gran precisión el espesor tanto de la nieve como de la escarcha depositadas, y mostró que allí nieva más de lo esperado, con tormentas más violentas y frecuentes de lo que se creía.



Vista de Marte, a partir de una composición de imágenes tomadas por la sonda espacial "Mars Global Surveyor".
Crédito: NASA/JPL/Malin Space Science Systems.

Y de una atmósfera tenue pasamos a otra muy densa, la de Titán, la mayor luna de Saturno. Este misterioso mundo anaranjado, mayor que Mercurio y algo menor que Marte, es, después de Ganimedes, el segundo satélite más grande de todo el Sistema Solar. Pero el interés de Titán no radica en su tamaño, sino en que representa la única luna que muestra nubes y una espesa atmósfera similar a la de los planetas, y puede ser el único cuerpo del Sistema Solar, aparte de la Tierra, que alberga océanos y sobre cuya superficie llueve —no agua, sino metano—. Y la misión *Cassini Huygens*, en la que participó el IAA a través del instrumento HASI, supuso una revolución en el conocimiento de este satélite.

Cassini llegó a Saturno a mediados de 2004 y su sonda *Huygens* descendió con éxito sobre Titán. Los micrófonos de HASI fueron protagonistas el día del aterrizaje al ofrecernos los sonidos del satélite, y el instrumento midió los distintos parámetros que definen la atmósfera, tanto desde un punto de vista fisicoquímico (presión, temperatura, turbulencia, composición) como radioeléctrico (conductividad, presencia de campos eléctricos o actividad tormentosa). Gracias a este instrumento pudimos comprobar que la atmósfera de Titán es muy similar a la que tenía la Tierra hace 3500 millones de años, antes de la aparición de la vida.

Titán, además, se reveló geológicamente muy parecido a nuestro planeta, con evidencias de precipitaciones, erosión, actividad fluvial y volcánica. Sin embargo, los elementos químicos implicados en estos procesos establecen grandes diferencias: el líquido que corre por la superficie del satélite es metano (y no agua), las rocas son de agua helada (y no silicatos) y, en lugar de lava, los volcanes expulsan agua a bajísimas temperaturas.

Ahora ya conocemos qué compone la atmósfera de Titán. Sabemos que lagos, dunas, montañas y ríos se esconden bajo su espesa neblina. E, incluso, de qué está compuesta esa neblina: en 2007 coordinamos un trabajo que reveló que se compone de moléculas orgánicas complejas procedentes de la atmósfera superior, varios cientos de kilómetros por encima de la sempiterna neblina que cubre la superficie de Titán, calienta su atmósfera y evita que se condense y disipe. Incluso, más recientemente, participamos en la medida de fuertes vientos en esa alta atmósfera, una región donde parecía no haber energía suficiente para desencadenar vientos tan veloces, de hasta 340 metros por segundo.

Saltamos de una luna con atmósfera a otra sin atmósfera y con mayúscula, la nuestra. En ocasiones, para solucionar un problema sobre un objeto astronómico hay que buscar nuevos puntos de vista o, incluso, observar otro objeto que en principio no tiene mucho que ver con el problema original. Así, el IAA dirigió la detección de los primeros destellos de impactos en la Luna con la intención de conocer la cantidad de materia que hay en el cinturón transneptuniano (la zona más allá de Neptuno que alberga gran cantidad de cuerpos helados, Plutón entre ellos), así como la frecuencia de impactos en nuestro planeta.

Los meteoroides son, en muchos casos, cuerpos muy volátiles, que la atmósfera de la Tierra desintegra sin dejar rastro. Pero, en la Luna, hasta los fragmentos más pequeños chocan contra su superficie, de modo que buscamos los destellos que producirían esos impactos, algo que se consiguió en 1999 durante una lluvia de estrellas. Un tiempo después se realizó la primera detección de impactos esporádicos (producidos por cuerpos no asociados a lluvias de meteoros, que son lluvias de material de cometas conocidos), y nuestras conclusiones apuntaban a que cae tres veces más materia de lo que se pensaba, y la mayor parte de tipo volátil.

Siguiendo el éxito de nuestros trabajos, la NASA estableció en 2005 un programa específico para detectar impactos, y en 2013 detectamos gracias a nuestro proyecto MIDAS (acrónimo en inglés de Sistema de Detección y Análisis de Impactos en la Luna) el destello más brillante, longevo e intenso nunca detectado en la superficie lunar (una roca con la masa de un coche pequeño chocó contra la Luna). Un hallazgo que sugería que la frecuencia con la que se producen los impactos contra nuestro planeta de rocas de un tamaño similar podría ser hasta casi diez veces más alta de lo que hasta ahora pensaba gran parte de la comunidad científica.



Concepción artística de la secuencia de descenso y aterrizaje sobre Titán de la sonda Huygens (ESA), en la que participó el IAA. El evento fue la culminación de un proceso de veintidós años de planificación, organización y cooperación entre ESA y NASA.

NUESTRA GRAN ESTRELLA MEDIANA

Al igual que el resto de las estrellas, el Sol es una gran esfera de gas incandescente, que debe su energía a las reacciones que se producen en su núcleo: la fusión de átomos de hidrógeno da lugar al helio, proceso en el que se libera la energía que viaja hacia la superficie y que se manifiesta en forma de luz y calor. Pero en ese viaje hasta la superficie la energía se transporta de distintos modos y a través de las diversas capas del interior solar, en un recorrido que puede durar unos diez millones de años.

Y, aunque de lejos pueda parecerlo, el Sol no es una estrella tranquila: sabemos que tiene manchas (o regiones algo más frías), que sufre fenómenos violentos (que, además de producir las auroras boreales, pueden interrumpir las comunicaciones terrestres) y que su actividad se ciñe a un ciclo de once años. Y todo ello se debe a su campo magnético, pero desconocemos con exactitud cómo funciona. En el IAA estudiamos ese motor de la actividad solar, y participamos de manera destacada en misiones como *SUNRISE* y *Solar Orbiter* (ESA), así como en la construcción del Telescopio Solar Europeo (EST).

Nuestro primer hito en el estudio del Sol tuvo lugar hace ya décadas, y resolvió un problema de casi un siglo. Las manchas solares, regiones en las que el campo magnético resta efectividad al transporte de energía (de ahí que sean más frías que el entorno), muestran dos zonas: una zona oscura central, la umbra, rodeada de otra algo más clara, la penumbra, que presenta filamentos brillantes y oscuros que se extienden de forma radial. En 1909 el astrónomo John Evershed descubrió flujos de gas en la penumbra, desde el centro de la mancha hacia los bordes, que

desaparecían en sus límites externos. Este efecto no contó con una explicación hasta 1995, en un trabajo que encabezamos y que contemplaba las estructuras como tubos magnéticos delgados en forma de U invertida, con un pie en la penumbra de la mancha y otro fuera. Propusimos que el movimiento del gas en el tubo se genera de forma natural debido a una diferencia de presiones entre sus dos pies, una solución que coincidía, por fin, con las observaciones.

Nuestro estudio del Sol, desde entonces, progresó en una doble vertiente, científica y tecnológica, que ha surcado el espacio en varias ocasiones. En 2010 veían la luz los primeros resultados de la misión SUNRISE, un telescopio solar de un metro de diámetro que, durante un viaje de cinco días en globo circunvolando el Ártico, estudió la superficie del Sol con un detalle de unos cien kilómetros, una resolución sin precedentes. La mayoría de los resultados, que ahondaban en la dinámica y el magnetismo de regiones que tradicionalmente se consideraban en calma y revelaban una actividad intensa e inesperada, procedían del instrumento IMaX, un magnetógrafo diseñado y construido íntegramente en España y en cuyo desarrollo participó el IAA.

El Sol es el astro que más influye en nosotros, de modo que es necesario conocerlo y, además, predecirlo: saber cómo se va a comportar y en qué medida nos va a afectar. La misión SUNRISE aportó luz a algunos de los antiguos problemas de la física solar, y reveló estructuras y fenómenos desconocidos. En el primer grupo se sitúa el calentamiento de la cromosfera, la capa inmediatamente superior a la fotosfera (esta podría considerarse la «piel» o superficie del Sol, ya que es la capa que vemos cuando lo miramos): se desconocía por qué, si la temperatura de la fotosfera se estima en seis mil grados, en la cromosfera se miden temperaturas de hasta veinte mil. IMaX/SUNRISE halló que en las regiones por debajo de la fotosfera se produce el doble de energía acústica de lo que se pensaba, lo que se acerca a los valores necesarios para explicar el calentamiento cuando dicha energía se transporta hacia arriba.

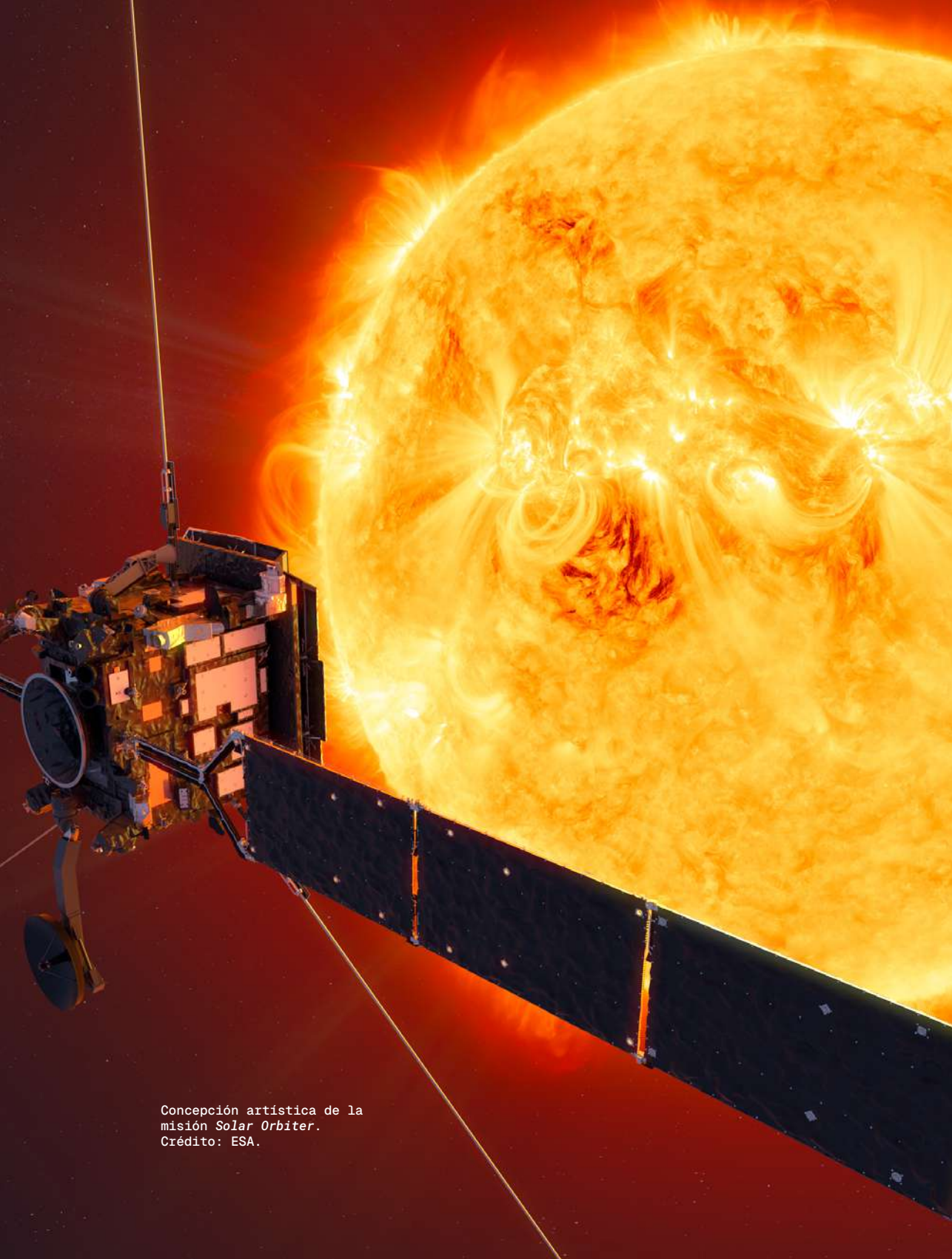
Otro antiguo problema, que databa de los años setenta del siglo pasado, se refería a la existencia de tubos de flujo magnético a pequeña escala, que se consideran los ladrillos del magnetismo solar, pero cuya existencia se había demostrado solo de forma indirecta debido a su reducido tamaño. IMaX permitió obtener pruebas directas de numerosos de estos tubos magnéticos, y en un trabajo que coordinó el IAA posteriormente pudimos seguir la evolución de uno de estos tubos, que resultó distinta a lo que se suponía.

Las novedades aportadas por SUNRISE fueron numerosas, y varias de ellas se relacionaban con lo que se conoce como granulación solar, un fenómeno debido a la existencia de gas caliente subiendo hacia la superficie (similar al burbujeo del agua al hervir), y que se manifiesta en forma de gránulos, que presentan un tamaño medio de unos mil kilómetros y una duración de unos cinco minutos. El equipo de SUNRISE descubrió torbellinos horizontales que avanzaban a través de las celdas de los gránulos, y pequeñas estructuras magnéticas horizontales que aparecían y desaparecían en la frontera de dichas celdas. Esto, junto con el hallazgo de chorros magnéticos supersónicos, que liberan gran cantidad de energía, ofreció una panorámica del Sol inédita y caracterizada por una actividad constante a pequeña y gran escala.

Una panorámica que hemos completado gracias a posteriores vuelos de la misión SUNRISE y a nuestra participación en *Solar Orbiter*, una misión desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA) con la participación de la NASA diseñada para estudiar la física solar y la influencia del Sol en el medio interplanetario. *Solar Orbiter* gira alrededor del Sol en una órbita con una distancia mínima inferior a la de Mercurio y fuera de la eclíptica, lo que le proporciona una perspectiva única y le permite observar los polos del Sol.

A bordo de la nave viaja SO/PHI (*Solar Orbiter/Polarimetric and Helioseismic Imager*), un generador de imágenes construido por un consorcio internacional (45 % Alemania, 42 % España, 10 % Francia y el resto, otros países), cuya parte española ha sido coordinada desde el IAA. Gracias a su inversor electrónico, el primero de su categoría desarrollado hasta la fecha, SO/PHI trabaja de forma autónoma: en lugar de enviar los datos originales a tierra, este dispositivo convierte las medidas en mapas de las magnitudes físicas solares, borra las primeras para liberar memoria y envía los segundos al centro de operaciones. SO/PHI nos enviaba, en 2020, el primer mapa magnético del Sol sin intervención humana y desde el espacio.

Solar Orbiter, lanzada en 2020, tiene aún por delante varios perihelios hasta que finalice su misión nominal (y su posible extensión), de modo que sin duda difundiremos novedades de SO/PHI en los próximos años.



Concepción artística de la
misión *Solar Orbiter*.
Crédito: ESA.

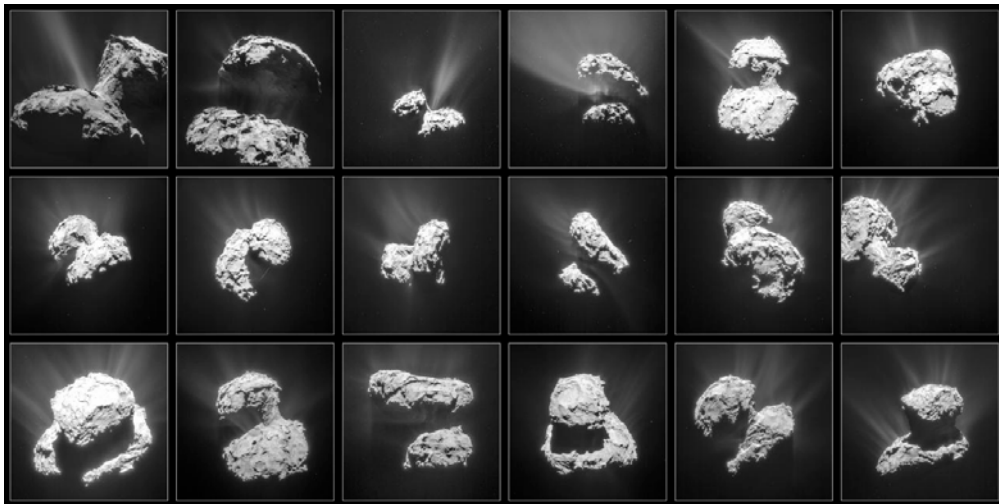
LOS OBJETOS MENORES (PERO SOLO EN TAMAÑO)

Además de estrella, planetas y lunas, el Sistema Solar alberga infinidad de cuerpos pequeños, rocosos o helados, que resultan claves para trazar un esbozo completo del sistema. Cometas, asteroides y cuerpos helados más allá de Neptuno forman una línea de investigación en el centro que busca comprender la historia del Sistema Solar: estos objetos son los bloques originales que, muy transformados, vemos hoy dar forma a cuerpos tan distintos como nuestro sólido planeta y el liviano Saturno, cuya densidad es tan baja que flotaría en el mar.

Empezamos el repaso de estos pequeños objetos con un viaje ya icónico de la exploración espacial, y una misión que nos propició muchísimas alegrías. En agosto de 2014, tras recorrer casi 6400 millones de kilómetros a través del Sistema Solar, la sonda *Rosetta* (ESA) se situó en órbita en torno a su objetivo, el cometa 67P. La operación permitió, por primera vez, observar *in situ* cómo un núcleo cometario, ese pequeño cuerpo sólido compuesto de hielos y polvo, desplegaba su actividad al aproximarse al Sol y desarrollaba la coma, o la mancha difusa central, y las colas, que aportan a los cometas su aspecto característico.

Esta maniobra supuso un hito, pero no fue el único: además de acompañar a 67P en su viaje hacia las regiones internas del Sistema Solar, la nave liberó un módulo, *Philae*, que se posó sobre el núcleo del cometa. Su aterrizaje fue accidentado y no pudo anclarse, pero sí tuvo tiempo para recoger muestras y enviar los datos antes de entrar en hibernación.

La misión *Rosetta* supuso una fuente inagotable de sorpresas: las imágenes no mostraban una roca irregular y esférica, sino un



Imágenes del cometa 67P tomadas por la cámara OSIRIS a bordo de la misión Rosetta.
Crédito: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/ UPD/ LAM/ IAA/ SSO/ INTA/ UPM/ DASP/ IDA.

cometa bilobulado que parecía un patito de goma. Un patito de goma que despertó, o mostró actividad, antes de tiempo, y cuya superficie era, como comprobó el módulo *Philae*, más dura de lo esperado (cuando se temía que pudiera hundirse en el polvo suelto). Además, pudimos observar sus estaciones, sus ciclos de hielo de agua y de dióxido de carbono, y también una diversidad de terrenos sorprendente para un cuerpo tan pequeño.

Rosetta permitió detectar varios compuestos clave en los cometas, como oxígeno y nitrógeno molecular, xenón o agua, cuyo estudio apunta a que los cometas sí afectaron a la atmósfera, pero no (o no mayormente) a los océanos terrestres. La misión también proporcionó la primera detección inequívoca de glicina en un cometa (la glicina es el único aminoácido que no requiere un medio acuoso para su formación), y multitud de moléculas orgánicas, así como fósforo, uno de los elementos clave en los organismos vivos, lo que apoya la teoría de que, en efecto, los cometas surtieron a la Tierra primigenia de moléculas clave para la química prebiótica.

Las observaciones de *Rosetta* confirmaron que 67P se formó en condiciones muy frías y que su procesamiento fue mínimo, lo que corroboraba que su interior era prístino y, por lo tanto, un ejemplo de cómo era el material de la nebulosa durante la formación del Sistema Solar. El Instituto de Astrofísica de Andalucía participó en dos de los once instrumentos a bordo de la nave, la cámara OSIRIS y el instrumento para el análisis de polvo GIADA, así como en la obtención de resultados científicos de la misión.

Los datos de *Rosetta* incidieron, además, en un problema ya conocido sobre los rasgos de las partículas de polvo en el universo. Teníamos, por un lado, los datos de las observaciones del cometa 67P desde tierra, que indicaban que estaba formado por partículas del tamaño de la micra (una milésima de milímetro). Y, por otro, contábamos con los datos de los instrumentos

Imagen del cometa 67P tomada por la
cámara OSIRIS a bordo de la misión
Rosetta. Crédito: ESA/Rosetta/MPS for
OSIRIS Team MPS/ UPD/ LAM/ IAA/ SSO/
INTA/ UPM/ DASP/ IDA.



que analizaron el polvo de 67P *in situ* y que indicaban que las partículas dominantes medían, aproximadamente, desde una décima de milímetro hasta varios milímetros, una conclusión que coincide a su vez con los datos del polvo observado en los discos de formación de planetas en torno a estrellas jóvenes.

Para analizar esta incongruencia, empleamos el Laboratorio de Polvo Cósmico (CODULAB) del IAA, que trabaja con análogos de polvo cósmico. Probamos con motas de polvo de distintos tamaños y características hasta encontrar las idóneas, aquellas que conseguían reproducir tanto la señal de las observaciones desde tierra como las de los instrumentos a bordo de *Rosetta*: partículas grandes, porosas, con forma achatada y con inclusiones de pocas micras.

Los resultados fueron espectaculares, porque solucionaban el problema y aportaban una panorámica nueva: si ya en su momento abandonamos la idea de que los granos de polvo, ubicuos en el universo, eran esféricos, ahora este nuevo modelo revelaba cómo eran las semillas de los cuerpos rocosos del Sistema Solar, que pueden medir varios milímetros y presentan estructuras porosas unidas por pequeñas partículas orgánicas. Algo parecido a pequeñas bolitas de algodón sucias.

Entre esos cuerpos rocosos, cuyas semillas por fin conocemos, hallamos una enorme familia que gira alrededor del Sol en un cinturón entre Marte y Júpiter, los asteroides. Se trata de cuerpos pequeños que carecen de atmósfera y cuyo tamaño oscila entre los casi mil kilómetros de Ceres —catalogado como planeta enano y en cuyo interior, según un estudio dirigido por el IAA en 2024, podría existir un reservorio de material orgánico— hasta los pocos centímetros (aunque los de reducido tamaño se conocen también como meteoroides).

Los asteroides del cinturón principal giran en torno al Sol en órbitas casi circulares, de modo que no sufren los cambios de temperatura que, en el caso de los cometas, producen las colas. Sin embargo, ya se han documentado unos veinte casos en los que un asteroide aumenta su brillo y despliega una cola de polvo, como P/2016 J1, un peculiar par de asteroides cuyo estudio coordinamos en 2017.

Los pares de asteroides se producen cuando un asteroide progenitor se fragmenta en dos, o por la desestabilización de sistemas binarios. Y, como no están ligados gravitatoriamente, van alejándose de manera progresiva, aunque dibujan órbitas similares en torno al Sol. Nuestro estudio mostraba que el asteroide P/2016 J1 se había fragmentado seis años antes, por lo que el sistema constituye el par de asteroides más joven del Sistema Solar. Pero, además, los dos fragmentos se hallan activados, es decir, muestran estructuras de polvo similares a las de los cometas. Era la primera vez que se observaba un par de asteroides con actividad simultánea y los datos indicaban que la fragmentación del asteroide se produjo en el perihelio (o máximo acercamiento al Sol) de la órbita anterior.

Otro asteroide bien conocido en el IAA remite a la misión DART (NASA), la primera misión de prueba de defensa planetaria diseñada para cambiar el curso de un asteroide. En 2022, DART colisionó contra su objetivo, el asteroide Dimorfo, un pequeño cuerpo de unos 160 metros de diámetro que orbita en torno al asteroide Didimo (de 780 metros de diámetro) formando un sistema binario.

El impacto cambió la órbita de Dimorfo y excavó más de cinco millones de kilos de material, en cuyo estudio participamos activamente. Realizamos un análisis fundamentalmente morfológico de la evolución de ese material, que permitió determinar la compleja interacción entre el sistema de asteroides y el polvo bajo la acción de la presión de radiación producida por la luz solar.

Observamos, por ejemplo, la aparición de una cola doble, que podría estar relacionada con impactos sucesivos de una porción de las partículas más grandes emitidas (*boulders*) sobre la superficie de Dídimo, o bien con la desintegración de esos mismos *boulders* debido a una alta velocidad de rotación o por efecto de colisiones mutuas. Vimos, así, una activación de asteroides, en este caso por mecanismos artificiales, que nos ayudará a caracterizar los asteroides activos naturales en los que las colisiones actúan como mecanismo de activación.

Las imágenes de alta resolución del impacto, analizadas en un trabajo de 2024 en el que participaba el IAA, revelaban que las superficies de ambos incluyen grandes bloques que sugieren que son de tipo «pila de escombros», de naturaleza extremadamente frágil. El equipo científico averiguó también que la superficie de Dídimo es más antigua que la de su satélite Dimorfo, con edades probables de alrededor de 12.5 millones de años para Dídimo y 300 000 años para Dimorfo. Estos datos apuntan a que Dimorfo se originó a partir de Dídimo, lo que apoya la teoría de que algunos de los sistemas binarios de asteroides se forman cuando aumenta la velocidad de rotación de un único asteroide de tipo pila de escombros: este expulsa restos, que a su vez acaban formando un nuevo compañero.

El estudio de impactos, como el de DART contra Dimorfo, cuenta con una larga tradición en el IAA, y trae a colación uno de los eventos planetarios más destacados del pasado siglo: la colisión del cometa P/Shoemaker-Levy 9 (SL9) con Júpiter. Por primera vez conocíamos la fecha exacta de un impacto de estas características, en el que el Shoemaker-Levy 9, dividido en veintitrés fragmentos por las fuerzas de marea de Júpiter, impactaría en el hemisferio sur del planeta en julio de 1994. Desde el IAA organizamos una ambiciosa campaña de observación y nuestro equipo registró la primera observación mundial del primer impacto desde el Observatorio de Calar Alto. El estudio de los impactos de los distintos fragmentos produjo varias publicaciones, que hilvanaron una precisa radiografía del evento.

Saltamos ahora Júpiter, el gigante del Sistema Solar, y progresamos hacia las regiones heladas del Sistema Solar. Entre Júpiter y Neptuno se halla una población de objetos extraños conocidos como centauros, que comparten características tanto con los cometas como con los asteroides. Se trata de cuerpos helados, pequeños y de bajo brillo, de modo que su estudio resulta extremadamente complejo y nuestro conocimiento sobre ellos es aún escaso. En 2021 liderábamos un estudio que revelaba las características físicas de uno de los mayores centauros conocidos, 2002 GZ₃₂, entre ellas su forma alargada.

Los centauros son tan poco conocidos que se ignora su número (podría oscilar entre varios miles y varios millones de más de un kilómetro de diámetro). Se cree que son los progenitores de los cometas de corto periodo, que completan su órbita en torno al Sol en menos de doscientos años, como el Halley, y que posiblemente escaparon de una población especial de objetos transneptunianos conocida como objetos del disco disperso.

Además de cometas, asteroides y sus parientes híbridos, existe otro reservorio de cuerpos pequeños en la región más externa del Sistema Solar. Más allá de Neptuno encontramos el cinturón de Kuiper, una región poblada por cuerpos rocosos y helados, entre los que destaca Plutón. Conocidos como objetos transneptunianos (TNOs, de su nombre en inglés), son en realidad restos o escombros sobrantes de la formación del Sistema Solar conservados en el mejor congelador conocido: el espacio. Al hallarse muy lejos del Sol —más de treinta veces la distancia de la Tierra al Sol— y a temperaturas cercanas a los 220 grados bajo cero, estos objetos apenas han sufrido alteraciones y conservan propiedades fisicoquímicas muy similares a las que tenían cuando se formó el Sistema Solar, hace unos 4600 millones de años. Su estudio nos ayuda a conocer el pasado del sistema, y proporciona valiosas claves para entender la estructura de la nebulosa de gas y polvo que dio lugar a los planetas.

Algunos, incluso, han generado pequeñas revoluciones. Ese fue el caso de Eris que, detectado en 2005, supuso un hito en la caracterización de objetos en el Sistema Solar. Los primeros cálculos apuntaban a que su tamaño superaba el de Plutón y, aunque en un principio se habló de décimo planeta, finalmente se impuso una redefinición del concepto de planeta que no incluía ni a Eris ni a Plutón.

En una decisión que produjo controversia, la Unión Astronómica Internacional decidió que ambos pasaran a integrar una nueva categoría de objetos, los planetas enanos, reduciendo el número de planetas del Sistema Solar de nueve a ocho. En 2011, un grupo internacional de astrónomos, en el que participó de manera destacada el IAA, estudió el paso de Eris por delante de una estrella y midió su tamaño con más precisión que nunca. Los resultados de este pequeño eclipse estelar reducían el tamaño de Eris a unos 1163 kilómetros (muy por debajo de los cálculos anteriores que lo situaban entre 1200 y 1400 kilómetros) y lo convertían, si no en un objeto menor que Plutón, en su gemelo. De modo que Plutón, con un radio de entre 1150 y 1200 kilómetros, podría conservar el puesto como el mayor objeto de esta región.

También en 2011 se producía una ocultación, o el paso por delante de una estrella de fondo, por parte de Makemake, uno de los planetas enanos menos conocidos. Empezamos el estudio de la ocultación desde el IAA y pudimos determinar con precisión su tamaño, forma y albedo, o fracción de luz reflejada. También hallamos que, a diferencia de Plutón, Makemake carece de atmósfera. El albedo de Makemake (de un 77 %) es superior al de Plutón (52 %), pero inferior al de Eris (96 %), y se cree que el alto brillo de este último se debe a que su atmósfera se condensó en la superficie, cubriéndola de hielo. El brillo de Makemake sería coherente con la existencia de una atmósfera parcial que hubiera colapsado sobre la superficie, y sugiere que podría desarrollar una atmósfera similar a la de Plutón cuando se acerque a su perihelio.

Otra pequeña revolución causada por estos objetos lejanos y gélidos, además del dramático destronamiento de Plutón, fue un hallazgo verdaderamente inesperado: anillos. Hasta hace apenas una década se creía que los anillos eran rasgos exclusivos de los grandes planetas gaseosos, como Saturno o Urano, pero el hallazgo de anillos alrededor de cuerpos no planetarios del Sistema Solar, con participación destacada del IAA, obligó a revisar estas estructuras, aparentemente más comunes de lo que se pensaba.

En 2013 y 2017, respectivamente, dos cuerpos del Sistema Solar ingresaban en el grupo de objetos con anillo: Cariclo, el mayor de los centauros, y Haumea, un planeta enano situado más allá de Neptuno con un tamaño, en su lado mayor, similar al de Plutón. Ambos presentan anillos estrechos y confinados, lo que sugiere la existencia de satélites «pastores», cuya fuerza de gravedad contribuiría a confinar los anillos, similares a los que se observan alrededor de Saturno y Urano.

Existe, sin embargo, una diferencia importante entre los planetas gigantes y los cuerpos no planetarios, derivada de la irregularidad de estos últimos: pueden presentar relieves, como cráteres o montañas, inexistentes en los planetas gaseosos, o mostrar una forma alargada (Haumea, por ejemplo, parece un balón de *rugby*). Así, la dinámica de estos sistemas de anillos en miniatura puede resultar más compleja que la de los planetas gigantes.

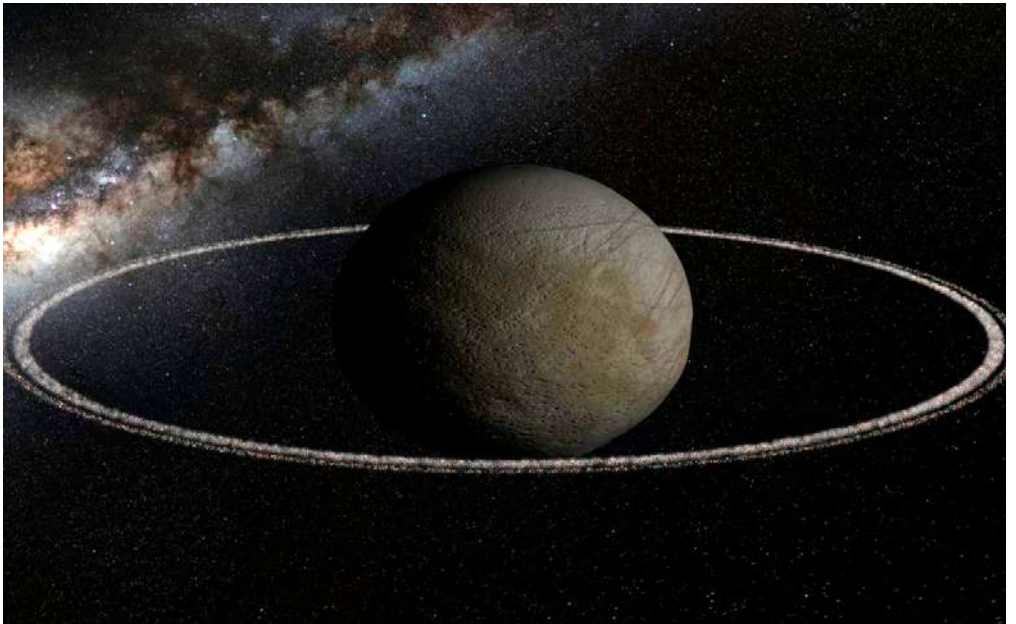
En 2023, el IAA encabezaba una campaña de observación con el telescopio JWST, sucesor del Hubble, para estudiar los delgados anillos de Cariclo. El trabajo reveló que el hielo de agua cristalina domina el espectro, tanto de Cariclo como de sus anillos, lo que apunta a que se producen en él microcolisiones continuas que exponen material pristino o desencadenan procesos de cristalización.

Y, también en 2023, contribuimos al hallazgo de un denso anillo alrededor del transneptuniano Quaoar. Con un radio de, nada menos, 4100 kilómetros, este anillo corresponde a unos 7.4 radios de Quaoar. Esto se halla mucho más allá del límite de Roche, la distancia a la que, según la teoría desarrollada por Édouard Roche alrededor de 1850, las fuerzas de marea del cuerpo central impiden que las partículas se agreguen en un satélite. Una teoría confirmada en todos los anillos densos de los cuatro planetas gigantes, así como los anillos de Cariclo y Haumea, que se encuentran efectivamente dentro o cerca del límite de Roche.

En cambio, el anillo de Quaoar ocupa una órbita donde debería haberse formado un satélite. Así, mientras que el criterio de Roche parece sólido para explicar cómo las fuerzas de marea interrumpen la formación de un satélite para formar un anillo, el proceso contrario, la acumulación de partículas en un satélite, debería implicar mecanismos más complejos que hemos pasado por alto, o ese anillo no existiría.

Dado que estamos ahora en las regiones más externas del Sistema Solar, propongo que tomemos impulso en el objeto transneptuniano más distante conocido, que podemos llamar 2018 AG37 o *FarFarOut* (que significa, literalmente, MuyMuyLejos), y salgamos de casa.

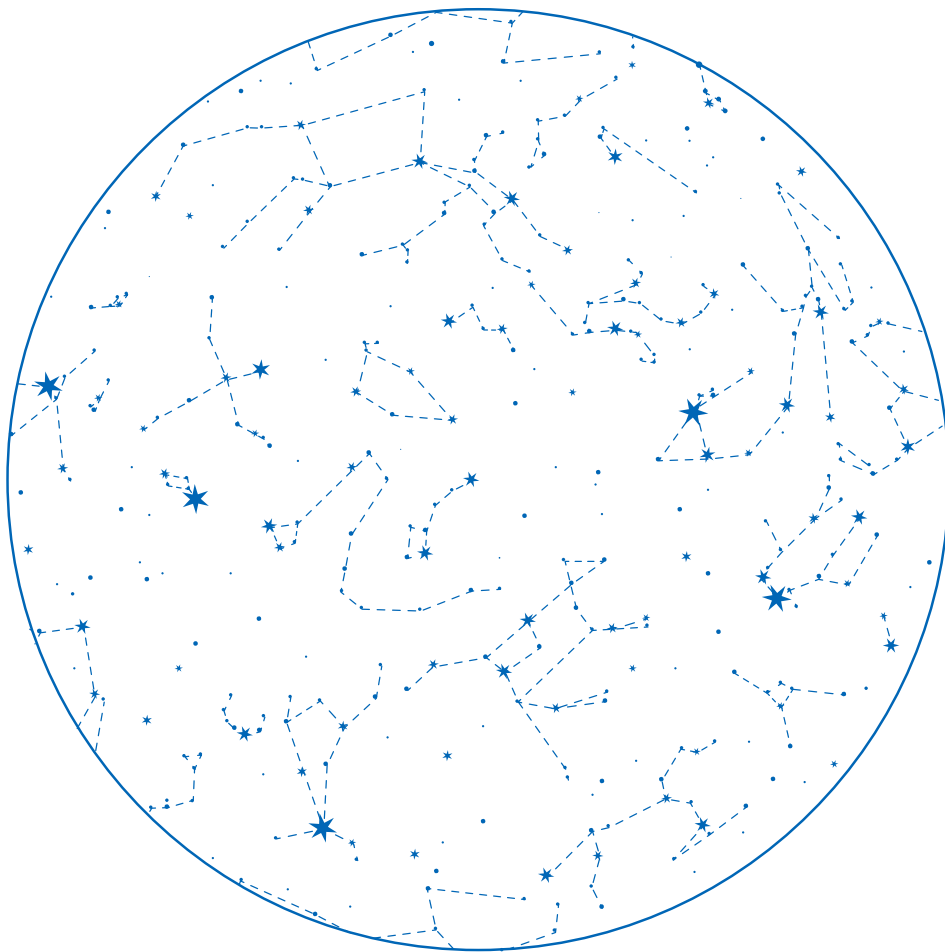
Vayamos a las estrellas.



Concepción artística de Cariclo y su sistema de anillos. Crédito: IAA.

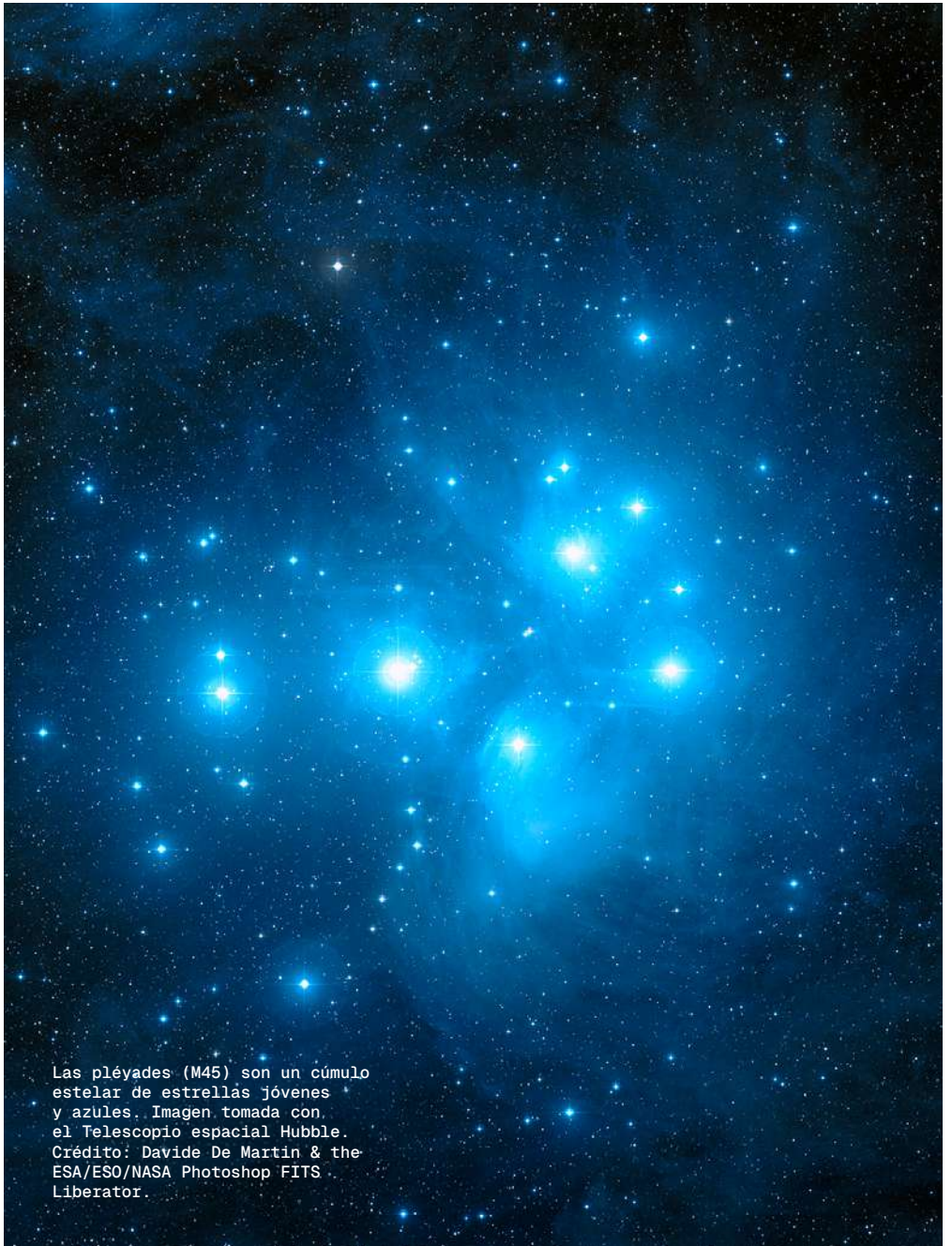
B.

ESTRELLAS



Auguste Comte aseguraba, en 1825, que nunca conoceríamos las estrellas de otra forma que como inalcanzables puntos de luz en el cielo debido a su enorme distancia. Claramente, se equivocó.

Las estrellas representan la unidad básica del universo. Nuestro planeta gira y vive gracias a una. La Vía Láctea, o cualquier otra galaxia, se compone de miles de ellas. Las estrellas son enormes esferas de gas, compuestas sobre todo por hidrógeno y helio, que generan energía gracias a las reacciones termonucleares que se producen en su núcleo: el hidrógeno, su combustible, se convierte en helio en un proceso que produce energía. Esta energía se abre camino hacia la superficie estelar y viaja enormes distancias hasta llegar a nuestros ojos. Pero no queda ahí todo, porque estas reacciones procesan los materiales de los que se compone el universo, enriqueciéndolo: es en el núcleo de las estrellas donde se formaron, a partir del hidrógeno, el oxígeno que respiramos o el hierro de nuestra sangre. Somos, literalmente, polvo de estrellas.



Las pléyades (M45) son un cúmulo estelar de estrellas jóvenes y azules. Imagen tomada con el Telescopio espacial Hubble. Crédito: Davide De Martin & the ESA/ESO/NASA Photoshop FITS Liberator.

EL INTERIOR DE LAS ESTRELLAS

Las estrellas tienden a formarse en cúmulos, de modo que, aunque presentan diferencias en su evolución, comparten la misma edad. Y dentro de su cúmulo muy pocas estrellas se hallan aisladas del resto; de hecho, el Sol constituye casi una excepción, ya que dos tercios de las estrellas forman parte de sistemas dobles o binarios.

Existen diversos tipos de estrellas dependiendo de su tamaño, masa, luminosidad, temperatura o composición química; también de si se encuentran solas o acompañadas, o de si su luminosidad presenta variaciones amplias. O, incluso, de si se trata de estrellas vivas o «muertas» (esto lo veremos más adelante, pero sí: las estrellas, al agotar su combustible, pueden dar lugar a objetos que emiten luz, pero no a través de la combustión de hidrógeno, como las enanas blancas o las estrellas de neutrones).

El bazar estelar es variadísimo, y abarca desde estrellas enanas ultrafrías a estrellas azules cinco veces más calientes que el Sol, estrellas jóvenes y viejas, estrellas tranquilas o estrellas cataclísmicas; o, incluso, estrellas que creemos que existieron, pero que aún no hemos observado, como las estrellas de la Población III: estrellas gigantes, compuestas solo de hidrógeno y helio, y que fueron las primeras en brillar.

Las estrellas fueron también, en los inicios del Instituto de Astrofísica de Andalucía, nuestra unidad básica: el estudio de las estrellas fue el germen de la actividad científica del IAA hace ya cinco décadas, y que después se extendió a todo el universo.

Estudiamos las estrellas desde muy diversos puntos de vista y a través de diferentes técnicas: empleamos la fotometría, que mide con precisión el flujo de luz de una estrella y sus posibles variaciones; la espectroscopía, una técnica que descompone su luz y permite estudiar su composición, temperatura o velocidad de rotación; y la astrosismología, que mide las pulsaciones estelares (un fenómeno parecido a los terremotos terrestres, pero causado por el movimiento del gas) y permite analizar la estructura interna de las estrellas. La misión internacional CoRoT (CNES/ESA), lanzada en 2006 y en la que participamos, empleó esta técnica con enorme éxito.

CoRoT, que estaba diseñado con un tiempo de vida de tres años, trabajó durante un total de seis y observó más de 160 000 estrellas. La precisión de CoRoT equivalía a observar el millón de bombillas que brillan en los Campos Elíseos y distinguir el parpadeo de una sola de ellas, y sus datos mostraron que nuestro concepto de estrella variable debía modificarse: existía una clasificación de estrellas que distinguía entre las que mostraban variaciones de brillo y las que no, y CoRoT reveló que prácticamente no existen estrellas cuya luz no varíe con el tiempo.

Además, sus resultados abarcaron varios tipos de estrellas: realizó la primera detección de oscilaciones de tipo solar, así como la primera señal clara de granulación en estrellas distintas al Sol (la granulación es un fenómeno debido a la existencia de gas caliente subiendo hacia la superficie, similar al burbujeo del agua al hervir). También descubrió cientos de frecuencias en estrellas de tipo delta-Scuti o cefeidas enanas (las cefeidas son un tipo de estrellas variables empleadas para medir distancias en el universo), y halló oscilaciones inesperadas en las estrellas gigantes rojas que servían de indicadores de su masa, radio o edad.

Las estrellas, como veíamos, vienen en muy distintos tipos, y existen modelos que establecen sus características. Modelos que aún seguimos afinando. Hasta hace poco, por ejemplo, se pensaba que las estrellas más calientes no presentaban actividad estelar superficial como el Sol, que exhibe manchas o fulguraciones.

Se cree que el campo magnético solar, responsable de la actividad de nuestra estrella, se produce por una mezcla de factores, entre ellos la presencia de lo que se conoce como zona convectiva, una región que abarca el 30 % más externo de su radio, así como el distinto ritmo de rotación entre esta región y la contigua y más interna (la región radiativa). En cambio, en las estrellas con una temperatura por encima de los siete mil grados, la capa convectiva se consideraba demasiado delgada para generar campos magnéticos intensos, de modo que se descartaba que pudieran presentar actividad superficial.

Pero parece que nos equivocábamos, ya que observaciones recientes han permitido detectar actividad en un gran número de estrellas calientes de tipo A, e incluso de tipo B, que en principio carecen de zona convectiva¹. Además, un trabajo encabezado por el IAA hallaba en 2019 una estrella pulsante de tipo A, ID 36, que muestra más de cien modos de pulsación y que presenta, ocultas entre sus pulsaciones, fulguraciones varios millones de veces más intensas que las del Sol. Contabilizamos nada menos que diez superfulguraciones en un periodo

1. Las estrellas se clasifican en distintos tipos según su temperatura, en una secuencia —OBAFGKM— donde la O corresponde a las estrellas más calientes, con hasta treinta mil grados, y la M a los astros más fríos, cuya superficie no supera los tres mil grados; el Sol, una estrella mediana de tipo G, mantiene una temperatura de unos seis mil grados.

de dieciocho meses, lo que indica la existencia de campos magnéticos superficiales en estos objetos, algo que a su vez contradice la teoría y nuestro conocimiento actual.

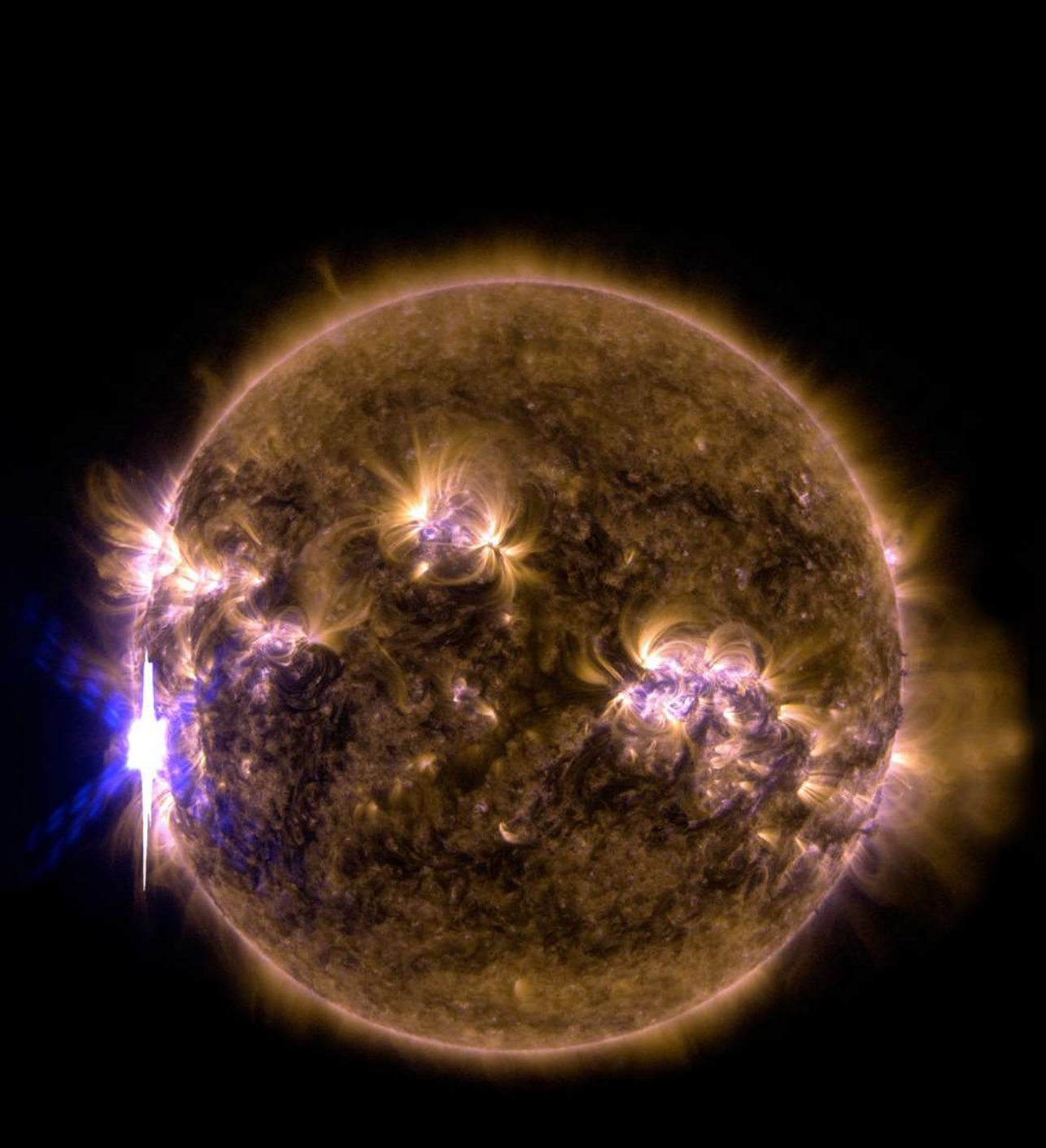
Otro objeto, más extraño aún, también nos sorprendió con pulsaciones inesperadas: un magnetar. Entre las estrellas de neutrones, objetos que resultan de la muerte de estrellas masivas y pueden contener medio millón de veces la masa de la Tierra en un diámetro de unos veinte kilómetros, destaca un pequeño grupo con el campo magnético más intenso conocido: los magnetares. Estos objetos, de los que apenas se conocen treinta, sufren violentas erupciones aún poco conocidas debido a su carácter inesperado y a su corta duración, de apenas décimas de segundo. El IAA lideró el estudio de una erupción en detalle y midió distintas oscilaciones, o pulsos, en su brillo durante los instantes de mayor energía.

Incluso en un estado inactivo, los magnetares pueden ser cien mil veces más luminosos que nuestro Sol. Pero, en el caso del destello que estudiamos, la energía que se liberó era equivalente a la energía que irradia nuestro Sol en cien mil años. Se cree que las erupciones en los magnetares pueden deberse a inestabilidades en su magnetosfera o a una especie de «terremotos» producidos en su corteza, una capa de carácter rígido y elástico de alrededor de un kilómetro de espesor. Independientemente del desencadenante, en la magnetosfera de la estrella se crearán un tipo de ondas, las ondas de Alfvén que, mientras rebotan hacia adelante y hacia atrás entre los puntos de la base de sus líneas de campo magnético, interactúan entre sí disipando energía.

Los pulsos detectados en la erupción, que desaparecieron a los 3.5 milisegundos después del estallido principal, eran consistentes con estas ondas, cuya energía es rápidamente absorbida por la corteza. Así, esta erupción proporcionaba un componente crucial para comprender cómo se producen las tensiones magnéticas dentro y alrededor de una estrella de neutrones.

Pero nuestra relación con los magnetares es más antigua. Un magnetar en concreto nos permitía, en 2008, hallar un posible eslabón perdido. Un equipo científico encabezado por el IAA difundía el estudio de SWIFT J195509+261406, un extraño y engañoso objeto. Parecía un estallido de rayos gamma, producto de la muerte de una estrella en una galaxia muy distante, y se clasificó como tal. Después se comprobó que no solo se hallaba mucho más cerca, sino que mostraba un comportamiento único: tras la emisión en rayos gamma y en apenas tres días, experimentó un total de cuarenta erupciones que se observaron en luz visible y, once días después, una pequeña erupción en el infrarrojo. Después desapareció.

Los datos sugerían que, muy posiblemente, un magnetar en nuestra propia galaxia era el responsable del fenómeno, lo que abría un excitante escenario. Hasta entonces, faltaban miembros en la familia de las estrellas de neutrones (o púlsares): en el extremo más energético se encuentran los magnetares, objetos jóvenes que se detectan por sus intensas y fugaces emisiones en rayos gamma en algunos casos. En el otro extremo se hallan las estrellas de neutrones aisladas, objetos muy débiles y viejos que emiten en radio. Aunque se había sugerido una posible evolución de los magnetares hacia una vejez tranquila y débil, nunca se había detectado un objeto que pudiera encajar entre los dos estadios y probar así esa evolución. El insólito comportamiento de SWIFT J195509+261406, con sus fugaces erupciones en luz visible, lo convertía en el candidato ideal.



Una fulguración observada en el Sol
(destello violeta a la izquierda).
Crédito: NASA/SDO.

Concepción artística de
un magnetar.
Crédito: ESO/L. Calçada.



Saltamos, ahora, de una familia de estrellas extrañas a una «casi estrella». Me refiero a una enana marrón, un objeto gaseoso que nunca llegó a desarrollar las reacciones nucleares que definen a las estrellas y que ocupa un rango de masas entre los planetas gaseosos más masivos y las estrellas más ligeras. Un tipo de objetos que, en el caso concreto de LSRJ 1835, muestran rasgos de planeta: en 2023 participamos en un trabajo que reveló la existencia, en torno a la enana marrón LSRJ 1835, de un cinturón de radiación similar al que existe en la Tierra (conocido como cinturón de Van Allen en honor al científico que halló que el planeta estaba rodeado de iones y electrones atrapados en su campo magnético, que interferían en las comunicaciones con las sondas espaciales).

Se trata de una estructura magnética también detectada en Júpiter, aunque el cinturón de LSRJ 1835, el primero hallado fuera de nuestro Sistema Solar, es diez veces mayor que el de Júpiter y millones de veces más potente. Y, al igual que ocurre en la Tierra y en Júpiter, contribuye a la formación de auroras, que liberan energía de manera muy concentrada y a altísima temperatura. Este nuevo cinturón se observaba gracias a la red de radiotelescopios VLBI, y abría la posibilidad de estudiar en el futuro el entorno magnético de los planetas fuera de nuestro Sistema Solar.

Estrellas con superfulguraciones, magnetares, enanas marrones..., pero no se vayan todavía, porque aún hay más estrellas imposibles: algunas incluso desafían la descripción con la que comenzábamos el capítulo y no se configuran como esferas.

La mayoría de las estrellas, debido a la rotación y a su carácter gaseoso, muestran cierto achatamiento en los polos. Pero algunas rotan tan deprisa que adoptan una forma claramente alargada, algo que también ocurre en estrellas binarias muy próximas debido a la atracción mutua: se han hallado estrellas que orbitan en torno al centro común en pocos minutos, que presentan formas claramente achatadas y rotaciones próximas a la velocidad de ruptura, un límite de velocidad que, de superarse, provocaría que la estrella se rompiera. Un escenario que nos lleva, de nuevo, a estrellas no ordinarias, las enanas blancas, que constituyen los restos de una estrella como el Sol que ha expulsado sus capas más externas y conserva un núcleo muy compacto (su densidad puede ascender a dos toneladas por centímetro cúbico o por cucharada).

El estudio de estas rápidas rotadoras constituye un desafío teórico, ya que requieren métodos específicos para determinar sus propiedades, y desde el IAA hemos aportado varias claves en su estudio. En 2011 revisábamos el concepto de «oscurecimiento por gravedad», introducido en 1924 y que provoca que, en una estrella achatada, la temperatura en los polos sea mayor que en el ecuador (en el Sol este efecto es apenas perceptible debido a su baja velocidad de rotación). La aplicación de un exponente de oscurecimiento por gravedad erróneo implica la obtención de valores de luminosidad, masa y edad equivocados, y en el IAA desarrollamos un nuevo formalismo que permite determinar los parámetros de estas estrellas con precisión.

Las estrellas, como veremos en el próximo capítulo, muestran una historia evolutiva en cierto sentido similar a la de los seres vivos: nacen, crecen, se desarrollan y mueren. Pero ¿cuánto viven las estrellas? El tiempo de vida puede ser largo para estrellas pequeñas de tipo solar (unos 10 000 millones de años), o breve para estrellas muy masivas —una estrella diez veces más masiva que el Sol vivirá unos cien millones de años—, pero en todos los casos depende de lo mismo: su núcleo.

Las condiciones para que se produzca la fusión de hidrógeno en helio solo se hallan presentes en el núcleo, de modo que el tamaño de este determinará cuánto combustible tiene disponible la estrella y, por extensión, cómo evolucionará y cuánto vivirá. Y en los núcleos de las estrellas más masivas puede ocurrir un fenómeno, denominado «rebosamiento del núcleo», que modifica drásticamente su camino evolutivo, principalmente su tiempo de vida. Un estudio encabezado por el IAA medía, en 2017, la intensidad de este efecto y establecía una clara dependencia con la masa de la estrella.

El núcleo de nuestro Sol aún cuenta con combustible para 5000 millones de años más, y su futuro a partir de entonces será agitado. Cuando se agote el hidrógeno nuclear, el Sol comenzará a hundirse bajo su propio peso, proceso que calentará y dilatará las capas externas, que engullirán las órbitas de Mercurio, Venus, y puede que de la Tierra. A esta etapa, la de gigante roja, le seguirá otra en la que la envoltura se expandirá libre formando una nebulosa planetaria, y en cuyo centro aún brillará el núcleo desnudo de lo que fue el Sol, una estrella enana blanca.

La Tierra, muy posiblemente, no sobrevivirá esta fase, pero hemos hallado un sistema que permite vislumbrar el futuro del Sistema Solar, formado por una enana blanca y un planeta similar a Júpiter: el planeta gira en torno a la estrella en una órbita amplia, a una distancia mínima de unas tres veces la que existe entre la Tierra y el Sol, lo que sugiere que Júpiter y Saturno podrían sobrevivir a la fase de gigante roja del Sol. Nuestro hermoso planeta, sin embargo, finalizaría su ciclo ahí.

PLANETAS MÁS ALLÁ DEL SISTEMA SOLAR

En ocasiones, el avance científico puede alcanzar velocidades altísimas, y la búsqueda de planetas fuera de nuestro Sistema Solar representa una de ellas. Cuando el IAA se fundó, hace cincuenta años, no existían evidencias de planetas alrededor de otras estrellas. El descubrimiento, en 1995, de un planeta que giraba en torno a la estrella 51 de la constelación Pegaso constituyó la prueba de lo que ya se suponía: el Sol, y en concreto el Sistema Solar, es uno de los miles de millones posibles —y solo dentro de nuestra galaxia—.

A día de hoy, contamos más de cinco mil planetas extrasolares descubiertos, y desde los primeros hallazgos estos planetas supusieron un desafío a la teoría que explica cómo se forman los sistemas planetarios, elaborada a partir de nuestro Sistema Solar. Según ella, los planetas nacen a partir de un disco plano de gas, polvo y pequeñas rocas en rotación, en cuyo centro se halla la estrella en formación. Este planteamiento impide la formación de planetas en las zonas más externas e internas del disco, en parte porque se encontrarían a temperaturas extremas —demasiado bajas o altas respectivamente— y en parte por la falta de materiales para ello.

Sin embargo, muchos de los planetas detectados se caracterizaban por la proximidad a su estrella, con distancias menores que la de Mercurio al Sol, y por su velocidad —pueden concluir una vuelta alrededor de su estrella en pocos días terrestres—. También la gran masa de muchos de ellos, que podía superar diez veces la de Júpiter, supuso una sorpresa.

La teoría tradicional suponía que la mayoría de los sistemas solares contendría un planeta semejante a Júpiter nada más pasar la «línea de la nieve», o distancia a partir de la que las temperaturas bajan tanto que el vapor de agua se condensa en forma de hielo. Nunca más cerca, ya que los gigantes gaseosos solo podían formarse en las zonas más frías, a una distancia mínima de cinco veces la que hay de la Tierra al Sol. La detección de esos «júpiteres» tan veloces y próximos a su estrella exigió el desarrollo de alternativas a la teoría, como las basadas en la formación de los planetas en partes del disco más benignas y en su posterior migración hacia el interior.

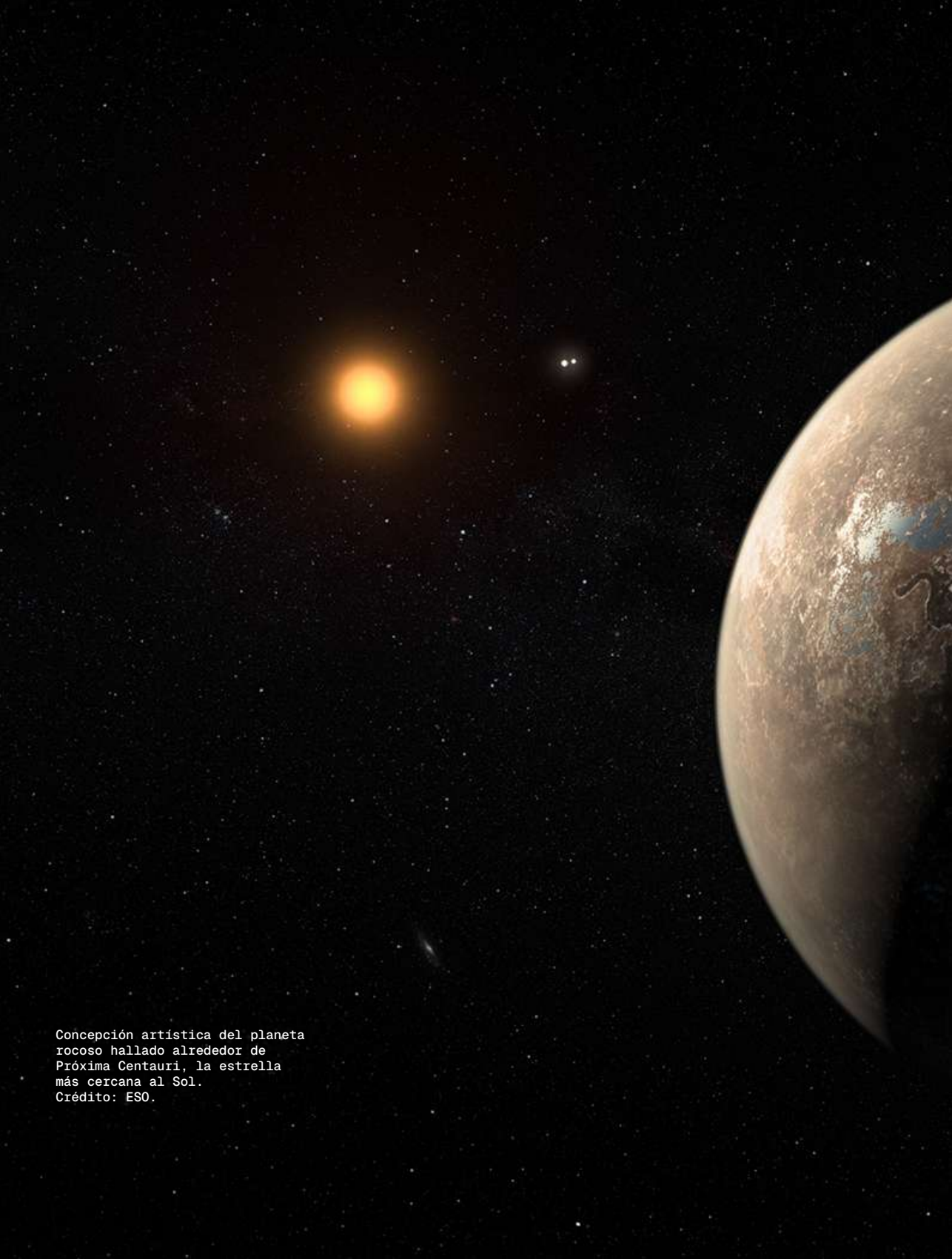
Pero estos hipergigantes gaseosos no representaban la única excepción, y cada vez es más habitual leer noticias sobre planetas que, hace décadas, resultaban inconcebibles: supertierras, minineptunos, neptunos calientes, planetas que se evaporan o con densidades imposiblemente bajas, o incluso planetas «rebeldes», que vagan por el espacio solitarios, sin estrella que los ilumine... Todo un zoo de cuerpos planetarios que aguarda a que lo conozcamos y expliquemos.

La búsqueda de exoplanetas comenzó en el IAA con una misión de la que ya hemos hablado, CoRoT. La «T» de CoRoT hacía referencia al método de los tránsitos, utilizado en la detección de planetas. Los tránsitos son pequeñísimos eclipses producidos cuando un planeta que gira en torno a una estrella atraviesa nuestro campo de visión. Resulta imposible ver esa trayectoria en planetas extrasolares, pero sí se puede medir la ligera disminución en el brillo de la estrella que los tránsitos ocasionan.

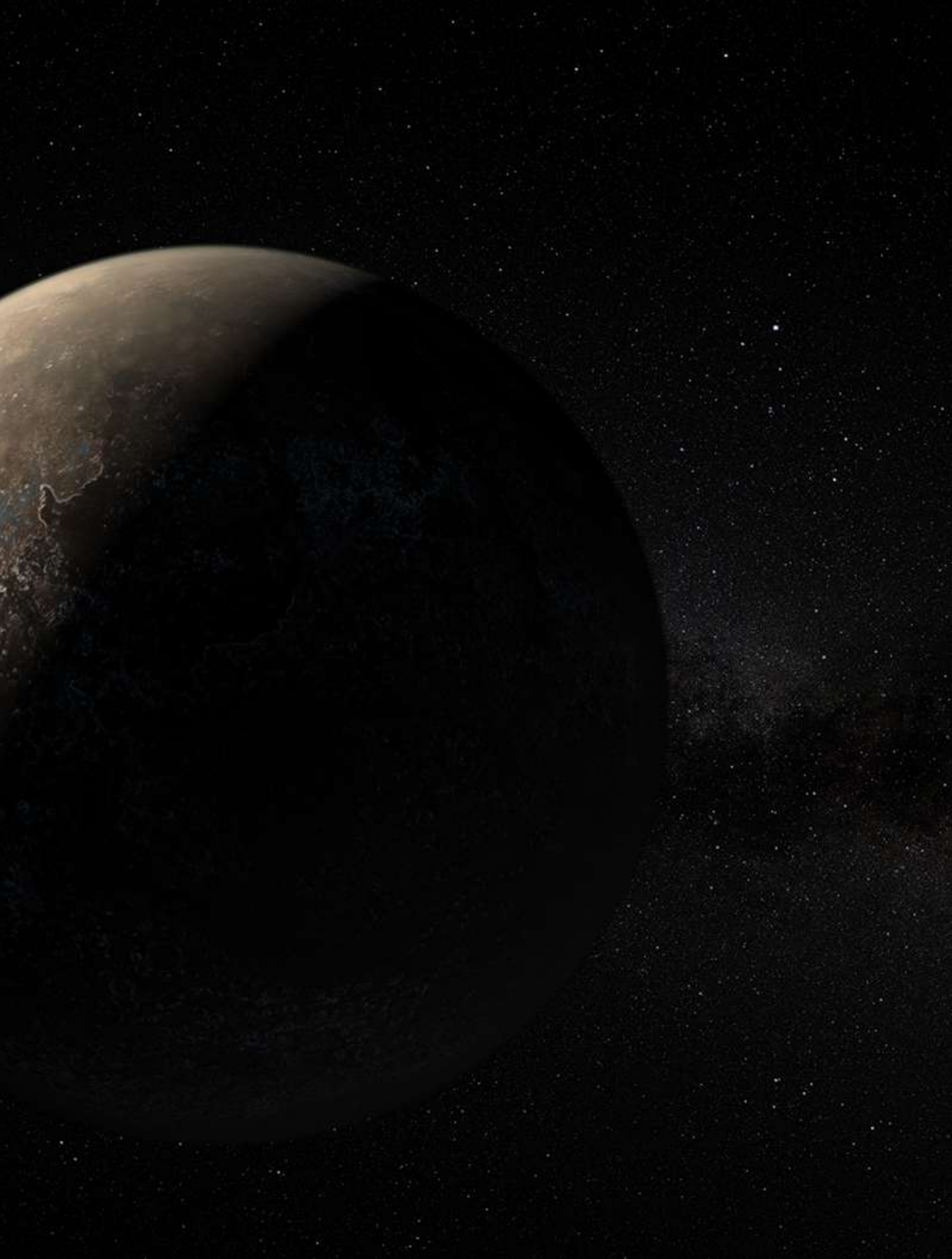
Gracias a este método, CoRoT halló un total de treinta y dos planetas, entre ellos el primer planeta de tipo rocoso detectado. El relevo de esta misión llegó de la mano de CARMENES, un instrumento diseñado para detectar planetas extrasolares, así como del empleo de instrumentos y observatorios internacionales que nos han permitido atesorar varios hitos científicos en el campo: por ejemplo, el hallazgo del planeta rocoso más cercano.

En 2016, la campaña de observación internacional RedDots, en la que participaba el IAA, enfocó cuatro telescopios hacia la estrella más cercana después del Sol, Próxima Centauri. Buscaban detectar el ligero tirón gravitatorio que un posible planeta ejercería sobre la estrella, que la obliga a dibujar una pequeña órbita y se traduce en oscilaciones en su luz. Así se halló Próxima b, un planeta con una masa mínima equivalente a 1.3 veces la terrestre y que gira en torno a Próxima Centauri cada 11.2 días dentro de la zona de habitabilidad, o la región en torno a una estrella en la que se producen las condiciones favorables para la existencia de agua líquida en superficie.

Un descubrimiento excitante, al que siguieron otros: en 2017 liderábamos el hallazgo de un cinturón de polvo alrededor de Próxima que, semejante al cinturón de Kuiper de nuestro Sistema Solar, constituye el material que sobró de la formación del sistema. Se trataba del primer indicio de que existe un complejo sistema planetario en torno a la estrella más cercana, con un rico pasado en interacciones, y en 2020 se anunciaba el descubrimiento, también con la participación del IAA, de un posible segundo planeta. Las observaciones, que abarcaban un total de diecisiete años, revelaron la presencia de una señal con un periodo de 5.2 años, compatible con la existencia de un segundo planeta en torno a Próxima Centauri con una masa mínima de unas seis veces la de la Tierra.



Concepción artística del planeta
rocoso hallado alrededor de
Próxima Centauri, la estrella
más cercana al Sol.
Crédito: ESO.



El estudio de Próxima ha sido fruto de una exitosa unión de distintas líneas de investigación en el centro, y tras el hallazgo de Próxima b un equipo del IAA se propuso comprobar si en este sistema vecino se producen también interacciones en radio (desde hace dos décadas se conoce que la interacción magnética entre Júpiter y una de sus lunas mayores, Ío, genera gran cantidad de emisión en radio similar a las auroras terrestres). Y vimos que, en efecto, estas interacciones se producen. Su hallazgo abrió una nueva vía en el estudio de los planetas extra-solares, ya que mostraba que se puede detectar la existencia de un planeta fuera del Sistema Solar observando con radiotelescopios las variaciones periódicas del sistema.

Otro hito del IAA en la búsqueda de exoplanetas ha sido, sin duda, el desarrollo y explotación científica del instrumento CARMENES, un espectrógrafo de alta resolución instalado en el Observatorio de Calar Alto y cuyo desarrollo colideramos. CARMENES se diseñó para hallar planetas rocosos en la zona de habitabilidad y emplea la técnica de la velocidad radial, que mide las oscilaciones que presentan las estrellas debido al pequeño tirón gravitatorio de sus planetas. Estas exotierras resultan difíciles de detectar en estrellas parecidas al Sol, ya que el bamboleo que produce un planeta como la Tierra en una estrella de tipo solar es mínimo. Por ello, CARMENES busca planetas de tipo terrestre alrededor de las estrellas más pequeñas, conocidas como enanas rojas o enanas M, donde el efecto de los planetas rocosos resulta más notorio.

CARMENES no solo fue el primer instrumento que España proponía para ser instalado en el Observatorio de Calar Alto, sino que además se concibió como un instrumento único en el mundo, tanto en precisión como en estabilidad: detecta variaciones de velocidad en el movimiento de estrellas situadas a cientos de billones de kilómetros con precisiones de un metro por segundo, y al observar de forma simultánea en el visible y en el infrarrojo realiza detecciones de planetas directas evitando falsos positivos.

En la más reciente publicación de datos realizada en 2023, se contaban cincuenta y nueve planetas descubiertos, diez de ellos en la zona de habitabilidad y varios en lo que, parece, es el tipo mayoritario de sistemas planetarios en torno a estrellas enanas, formados por planetas rocosos, bien tierras o supertierras. CARMENES también contribuyó en 2018 al descubrimiento de una supertierra fría orbitando alrededor de la estrella de Barnard, el segundo sistema estelar más cercano a la Tierra, y en 2024 al hallazgo de un planeta rocoso en una enana ultrafría, un tipo de estrellas hasta diez veces menos masivas y mil veces menos luminosas que el Sol y en torno a las que apenas se conocen planetas.

Pero no solo CARMENES nos provee de observaciones de esos mundos distantes. Gracias al espectrógrafo HARPS (ESO, Chile) pudimos colaborar en 2020 en el hallazgo de uno de los sistemas multiplanetarios más cercanos conocidos, con dos supertierras girando alrededor de una enana roja, y en 2023 de un planeta, LP791-18, que podría hallarse cubierto de volcanes.

Este último hallazgo fue gracias a una combinación de datos de satélite con telescopios terrestres, y completó un curioso sistema de tres planetas: LP791-18 sería el menor de ellos, y gira en una órbita en torno a la estrella que lo acerca peligrosamente al mayor de sus compañeros, un minineptuno con unas nueve veces la masa terrestre. Esto produce una interacción gravitatoria que deforma ligeramente el planeta recién hallado y calienta su interior, lo que a su

vez posiblemente genera actividad volcánica a lo largo de su superficie (como, por ejemplo, sabemos que ocurre en Io, el satélite de Júpiter que ostenta el récord en actividad volcánica de todo el Sistema Solar).

También, en el campo de los exoplanetas, hemos obtenido resultados que alteran nuestra concepción de los sistemas solares. O, incluso, de los propios planetas: en 2024 coliderábamos el descubrimiento de un planeta gigante gaseoso tan ligero como el algodón de azúcar. Denominado WASP-193b, es un 50 % más grande que Júpiter, pero muestra una densidad aproximadamente veinticinco veces menor, unas características que impiden que encaje en las teorías de formación planetaria actuales.

Algo similar ocurre con WASP-19b, un planeta con una masa algo mayor que la de Júpiter, pero un 40 % mayor. Se trata del planeta gigante con el periodo orbital más corto conocido, ya que gira en torno a su estrella en apenas diecinueve horas, y se estima que la temperatura de su atmósfera alcanza los 1700 grados centígrados. Cuando WASP-19b pasa por delante de su estrella, la luz de esta atraviesa la atmósfera del planeta y sufre pequeñas modificaciones. Un análisis cuidadoso de esa luz permite aislar la huella de los elementos químicos que componen la atmósfera del planeta, y así fue posible hallar pequeñas cantidades de óxido de titanio, agua y sodio, así como una especie de neblina que cubre el planeta. Este estudio, en el que participaba el IAA, abría la puerta al análisis en detalle de la química atmosférica en planetas extrasolares.

Estas atmósferas extrañas requieren de tecnología novedosa para su análisis, lo que nos lleva de nuevo al instrumento CARMENES, que se está posicionando como un instrumento líder en los estudios atmosféricos gracias a su canal infrarrojo. Denominado CARMENES-NIR, fue desarrollado en el Instituto de Astrofísica de Andalucía y constituye una referencia en su campo a nivel mundial. En 2018 analizaba la proporción de helio y de vapor de agua en las atmósferas de varios exoplanetas, ofreciendo datos con mejor resolución que los del Telescopio Espacial Hubble y abriendo nuevas vías en estudios atmosféricos.

En 2021, datos de CARMENES permitían confirmar la primera detección de oxígeno en una atmósfera exoplanetaria, la de KELT-9b, uno de los mundos más extremos conocidos. Se trata de un gigante gaseoso que gira alrededor de su estrella en treinta y seis horas y cuya atmósfera presenta una temperatura tan alta como para fundir el hierro. Desde su hallazgo se busca comprender la naturaleza de un objeto tan caliente y peculiar, así como la razón de que no se desintegre estando tan cerca de su estrella.

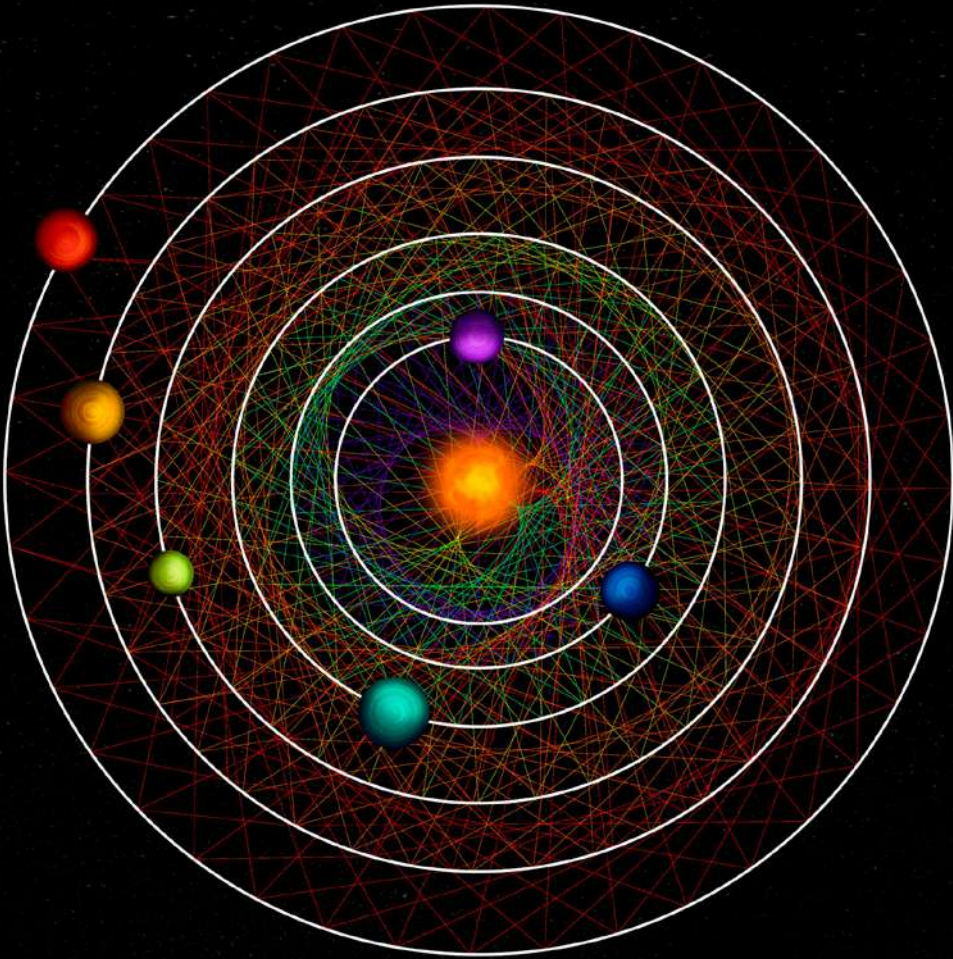
SISTEMAS SOLARES

Como señalaba al principio de este epígrafe, los sistemas solares que estamos encontrando en estrellas lejanas desafían nuestra concepción de lo que, creíamos, eran los sistemas planetarios. Y desde el IAA hemos contribuido, a través de varios resultados, a complicar un poco más ese escenario.

En 2023 participamos en el descubrimiento de un sistema de seis planetas que giran alrededor de HD 110067, una estrella similar al Sol. Un sistema que resulta particular porque todos sus miembros giran alrededor de la estrella en órbitas sincronizadas, o en resonancia, algo que raramente se observa y que indica que el sistema mantiene la misma configuración que cuando se formó hace miles de millones de años: sabemos que los planetas tienden a formarse en resonancia, una configuración que puede perturbarse fácilmente debido a la existencia de un planeta muy masivo, como Júpiter en nuestro Sistema Solar, a un encuentro cercano con una estrella o a un impacto.

La resonancia gravitatoria, además de una rareza, puede ser nuestra aliada en el estudio de los planetas, porque permite conocer su masa, un parámetro difícil de obtener con precisión. Es lo que ocurre en el sistema TOI-2096, compuesto por una supertierra y un minineptuno que giran alrededor de una estrella fría en un baile sincronizado, y que podría funcionar como una piedra de Roseta para comprender cómo funciona la gestación planetaria.

Se estima que el radio de TOI-2096 b es 1.2 veces mayor que el del planeta Tierra (de ahí la denominación de supertierra). Asimismo, el radio de TOI-2096 c es un 55 % más pequeño que el de Neptuno (1.9 radios terrestres), por lo que se le denomina minineptuno. La formación de planetas pequeños, de menos de



Trazar un vínculo entre dos planetas vecinos en intervalos de tiempo regulares a lo largo de sus órbitas crea un patrón único para cada pareja. Los seis planetas del sistema HD 110067 crean un patrón geométrico fascinante debido a su cadena de resonancia.
Crédito: Thibaut Roger (NCCR PlanetS).

cuatro radios terrestres, sigue siendo hoy día un misterio, ya que existen diferentes modelos que intentan explicar cómo se forman, pero ninguno acaba de ajustarse a las observaciones. TOI-2096 es el único sistema conocido que tiene un planeta pequeño, probablemente rocoso, y uno más grande con el tamaño justo donde todos los modelos se contradicen.

Si los planetas rocosos aún esconden sus mecanismos de formación, el camino que recorren los planetas gigantes gaseosos tampoco está del todo claro. En 2019, de nuevo gracias a CARMENES, se hallaba un sistema formado por un planeta gigante en torno a una estrella enana. El hallazgo ponía en tela de juicio el modelo de formación de los planetas gigantes más aceptado, que afirma que nacen a partir de un núcleo sólido que va acumulando gas: la presencia de un gigante gaseoso alrededor de una estrella de baja masa indica que el disco original era anormalmente masivo, o que el modelo dominante no se aplica en este caso. Así, se retomó otro posible escenario de formación de planetas, el «modelo de inestabilidad de disco», que defiende que los gigantes gaseosos pueden formarse directamente a partir de la acumulación de gas y polvo en el disco protoplanetario en lugar de requerir un núcleo «semilla».

Las teorías actuales de evolución planetaria predicen, también, que los planetas gigantes, como Júpiter o Saturno, nacen con grandes dimensiones y densidades muy bajas y que, tras cientos de millones de años de lenta contracción, alcanzan su tamaño final. Sin embargo, un reciente hallazgo muestra que quizá estas expectativas no respondan a la realidad en algunos casos.

Un equipo científico en el que participamos medía, en 2021, la masa de los planetas del sistema V1298 Tau, uno de los más jóvenes conocidos, y concluía que los planetas gigantes podrían culminar su contracción mucho más rápido de lo esperado. Esto suponía un cambio de paradigma e impulsaba la idea de que los planetas empiezan a formarse en etapas mucho más tempranas de la evolución conjunta con la estrella. Por ejemplo, si se comprueba que V1298 Tau es un caso normal, y que su evolución resulta similar a la de la mayoría de planetas, habría que replantear la historia de formación de los planetas gigantes del Sistema Solar.

Los exoplanetas parecen criaturas díscolas empeñadas en destruir nuestros modelos e ideas, y en ocasiones lo hacen en grupo. En 2022 encabezábamos un estudio que sugería que muchos de los planetas conocidos como supertierras o minineptunos pueden albergar grandes cantidades de agua, con composiciones de hasta un 50 % roca y un 50 % agua (la Tierra está compuesta por solo un 0.02 % de agua). Pero esa agua se encuentra posiblemente bajo la corteza, en lugar de fluir por la superficie en forma de océanos o ríos.

Este hallazgo contradice la idea generalizada de que estos mundos se dividen en dos clases. La primera, compuesta por planetas secos y rocosos, y la segunda, por planetas rodeados de una extensa y tenue atmósfera de hidrógeno, helio o ambos. Por el contrario, estos mundos parecen dividirse claramente en dos familias: rocosos o acuáticos. Este escenario refuerza una de las teorías de formación planetaria más aceptadas, que sugiere que los mundos rocosos se forman en las partes internas de sus sistemas solares, mientras que los mundos acuáticos se forman en las regiones más externas y después migran hacia el interior con el tiempo.

En este progreso hacia una teoría completa emergen conceptos que, sobre la marcha, vamos corrigiendo. Por ejemplo, existe una región en el gráfico de órbitas planetarias en la que se han registrado muy pocos planetas similares a Neptuno con órbitas de entre dos y cuatro días alrededor de su estrella. Conocida como el desierto de los Neptunos, en esta región se hallaban, en un estudio de 2024 coliderado por el IAA, nuevos planetas en torno a estrellas enanas rojas. Estudios anteriores señalaban que en esa región ocurren fenómenos físicos que la «vacían» de planetas de estas características, como la pérdida de atmósfera debida a la radiación de su estrella. Ante los nuevos hallazgos, nuestro estudio proponía una nueva definición del desierto de los Neptunos, que abarca únicamente planetas de entre dos y diez veces el tamaño de la Tierra, y que, además, deben orbitar muy cerca de su estrella.

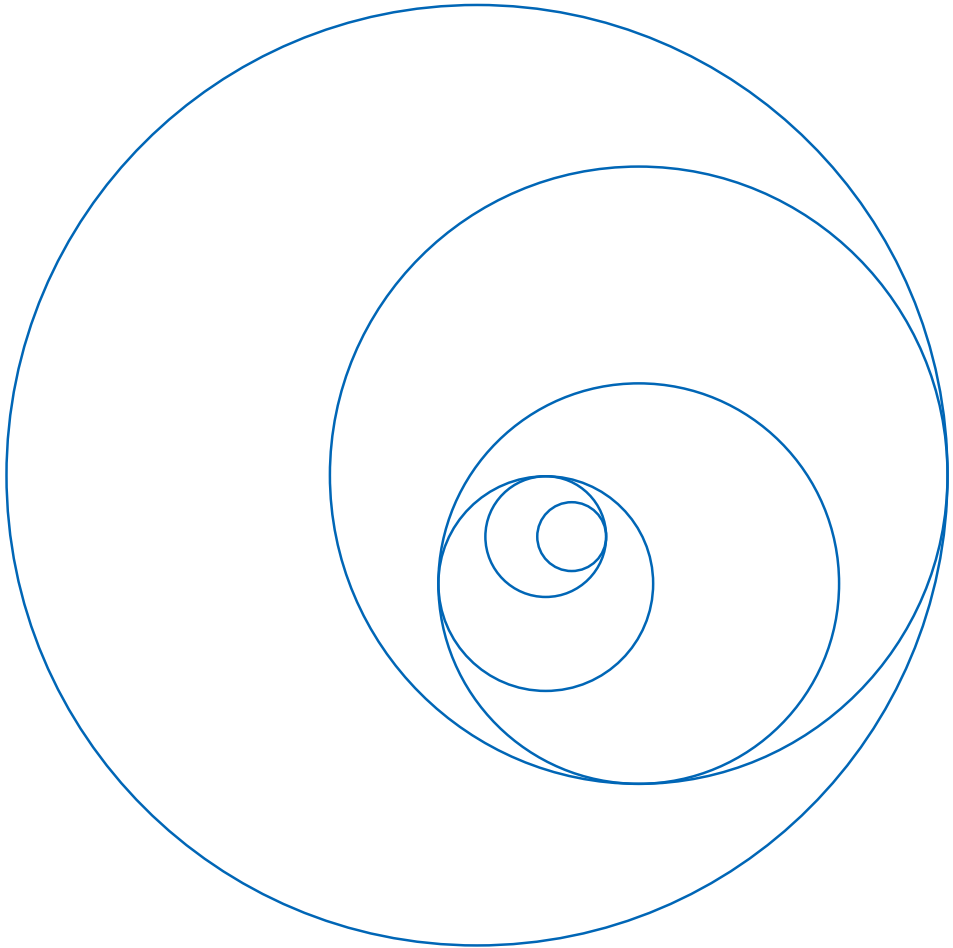
Poco a poco iremos encajando las piezas en este rompecabezas planetario. Comprenderemos esos mundos que, con nuestro conocimiento actual, parecen imposibles. En el camino, nos acercaremos cada vez más a un gemelo de la Tierra, un planeta rocoso que pueda albergar agua líquida y, quizá, vida. Y en este camino tendrá un papel fundamental la misión PLATO (ESA), que buscará planetas del tamaño de la Tierra o mayores en la zona de habitabilidad de estrellas parecidas al Sol.

La misión, que también estudiará las oscilaciones estelares, se compone de un conjunto de veintiséis telescopios. Estará equipada con el sistema de cámaras más grande enviado nunca al espacio y supondrá un hito en la participación tecnológica española en misiones espaciales europeas; en particular, el IAA será el corresponsable del diseño y construcción de la unidad electrónica principal de la misión.

Será hermoso contemplar cómo, gracias a PLATO y a instrumentos cada vez más precisos, aparecerán más planetas discolos, inexplicables, rarísimos... Y cómo, con el tiempo, terminarán encajando en un modelo más diverso, que plantee distintos caminos evolutivos posibles y que encaje esos planetas imposibles. Un modelo más completo y rico.

C.

**EL MEDIO
INTERSTELAR**



**Y EL NACIMIENTO
DE LAS ESTRELLAS**

Os he hablado de estrellas y planetas, pero ¿qué ocurre en el espacio que hay entre las estrellas, esos años luz de oscuridad?

Existe una tendencia a pensar que se trata de un espacio vacío. Y, aunque constituye un entorno extremadamente tenue, el medio interestelar, formado por gas y un pequeño porcentaje de polvo, resulta fundamental. Tanto que cuesta imaginar el ciclo de vida de las estrellas sin él.

Las estrellas se forman en las nubes moleculares, regiones especialmente densas del medio interestelar, y son las responsables de enriquecerlo. Mediante las reacciones nucleares que se producen en su interior, las estrellas generan elementos cada vez más pesados y, cuando mueren, expulsan al medio la mayor parte de su masa; de este modo el medio se enriquece y surgen generaciones de estrellas que, al igual que el Sol, cuentan desde su nacimiento con elementos más pesados que el hidrógeno y el helio que componían las primeras generaciones. En el IAA estudiamos el ciclo de vida de las estrellas con especial atención a las primeras y últimas etapas, durante las que su relación con el entorno resulta muy significativa.

Las estrellas, y las agrupaciones que forman (cúmulos y galaxias), son el principal motor de casi todos los procesos que estudia la astrofísica. Sin embargo, la formación de las estrellas aún se considera un problema abierto, especialmente en lo que se refiere a las condiciones iniciales que llevan a una gran nube de gas a dividirse en los fragmentos, o núcleos preestelares, que formarán las estrellas. Por ejemplo, tan recientemente como en 2018 dirigimos una investigación que aportaba una pieza clave.

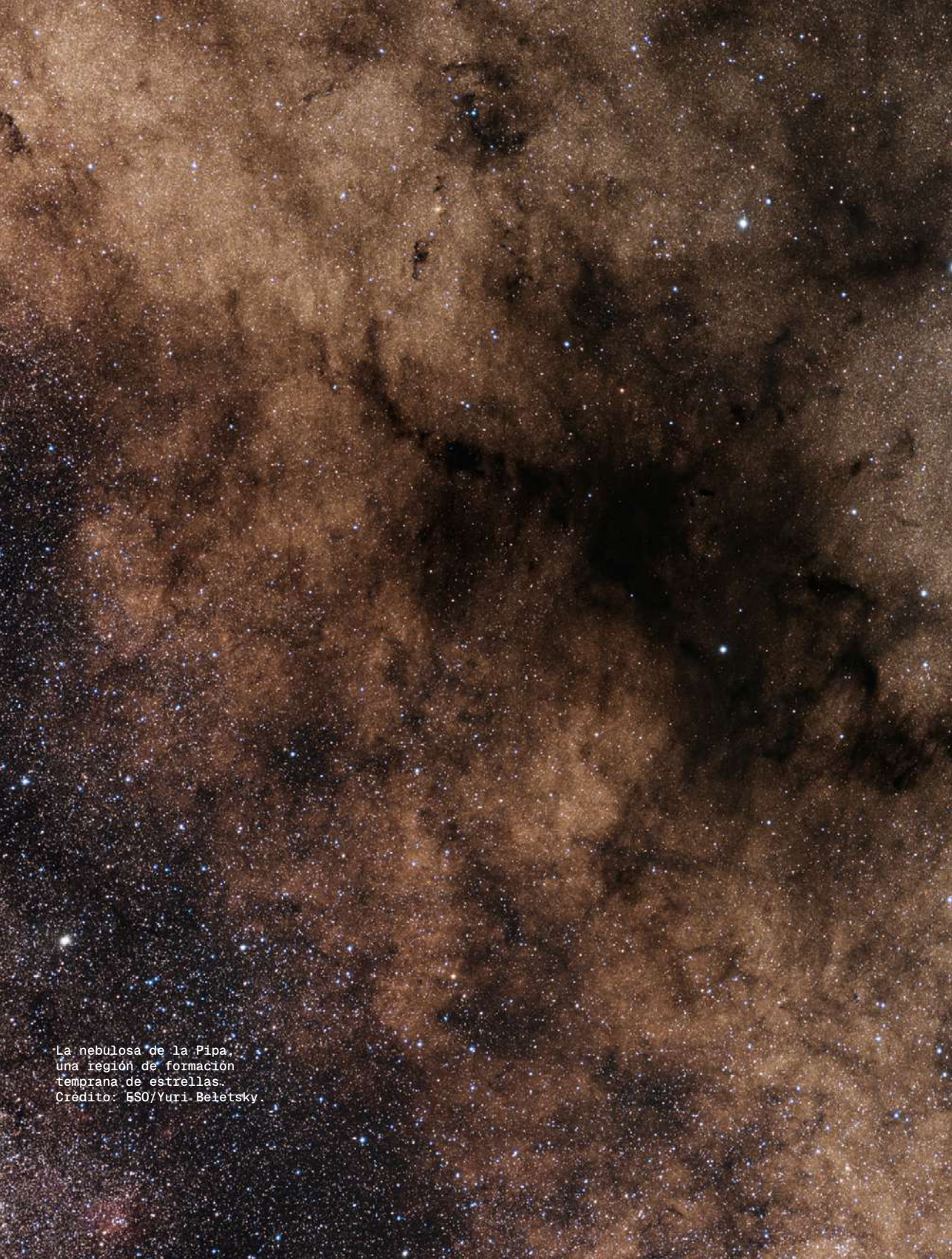
El proceso de formación de las estrellas comienza con el colapso gravitatorio de una nube de gas fría y masiva. La materia en el interior de la nube no se distribuye uniformemente, sino que forma estructuras similares y transitorias (parecidas a las nubes de vapor de agua de nuestra atmósfera), representativas de un equilibrio de fuerzas en el gas. Cuando se rompe el equilibrio, las zonas más densas y masivas de la nube comienzan a contraerse, acumulando materia de los alrededores y dando lugar a los núcleos preestelares.

Si en estos núcleos la gravedad vence a la presión del gas, pronto estaremos observando protoestrellas, que comenzarán a generar reacciones nucleares en su interior y a evolucionar hacia la fase de estrella adulta. Y, una vez que las estrellas han nacido, la gravedad gobierna la evolución dinámica y la distribución espacial de las estrellas.

Nuestros resultados de 2018 mostraban que los núcleos de la nebulosa de la Pipa, una región de formación estelar muy temprana, están segregados no solo por masa, sino, de forma más concluyente, por su densidad interna, lo que sitúa la densidad de los núcleos como la principal variable física que dibuja el mapa inicial de la formación estelar.

Ese mapa inicial nos remite a épocas en las que las estrellas aún no brillan. Son aún protoestrellas, que crecen acumulando gas de la nube molecular progenitora. Al mismo tiempo, estos embriones estelares liberan el material sobrante a través de dos chorros que emergen de los polos y que, según un estudio que coordinamos en 2017, podrían inducir, a su vez, la formación de una estrella en el vecindario: el choque del material a alta velocidad del chorro podría generar inestabilidades en otras regiones de la nube molecular y desencadenar el nacimiento de otra estrella. Estrellas que provocan el nacimiento de estrellas. Hermoso, ¿verdad?

Los embriones de las futuras estrellas se encuentran ocultos en el interior de las oscuras nubes, por lo que la observación del proceso de formación estelar, especialmente en sus primeras etapas, resulta complicado. Afortunadamente, las ondas de radio e infrarrojas pueden atravesar estas regiones opacas y nos permiten atisbar su interior.



La nebulosa de la Pipa,
una región de formación
temprana de estrellas.
Crédito: ESO/Yuri Beletsky



En 2001, un equipo científico con participación del IAA observaba en radio la región de Cefeo A para confirmar la presencia de un disco protoplanetario en torno a la estrella en formación HW2. Y detectamos, en sus proximidades, algo inesperado: una estructura en forma de arco compuesta por máseres de agua (la emisión máser es una emisión amplificada, similar al láser, pero en radio en lugar de en luz visible). El radio de la circunferencia que trazaba el arco medía sesenta y dos veces la distancia entre la Tierra y el Sol y, como en su centro no se conocía ninguna estrella, todo parecía apuntar a que una estrella joven hubiera expulsado una burbuja esférica de material que, al chocar contra la nube molecular, producía la emisión máser.

Estudiando datos de archivo localizamos la débil emisión de una estrella en el centro del círculo, y calculamos que la burbuja tendría unos treinta y tres años (en astrofísica, raramente podemos hablar de años o décadas, o de procesos que se desarrollan a lo largo de una vida humana, y un hallazgo así es excepcional). Se sabía que las estrellas en formación expulsan materia a velocidades supersónicas, pero las teorías y observaciones indicaban que la pérdida de material se producía a través de chorros bipolares. Por tanto, una eyección esférica supuso todo un reto para las teorías sobre la formación estelar.

Un reto que, posteriormente, contribuimos a resolver. En 2015 participábamos en la observación de cómo W75N(B)-VLA2, una estrella masiva en formación, había cambiado drásticamente el modo en el que expulsaba materia, pasando de hacerlo de forma prácticamente esférica a adoptar una forma alargada, con la eyección concentrada a lo largo de una sola dirección. Aunque el proceso de formación estelar dura centenares de miles de años, en este caso fuimos testigos de cómo, en apenas dieciocho años, entre 1996 y 2014, se producía la evolución hacia la formación de un chorro. Los datos obtenidos eran consistentes también con la existencia de un disco en torno a la protoestrella, lo que completaba el escenario de formación estelar descrito en los modelos.

El estudio, precisamente, de los chorros a través de los que las estrellas en formación liberan material nos permitió, en un trabajo que coordinamos en 2010, obtener una visión panorámica de los mecanismos que operan en el universo. Medimos el campo magnético en el chorro de materia denominado HH 80-81, eyectado por la estrella en formación IRAS 18162-2048, observando la radiación sincrotrón, producida por electrones viajando a velocidades próximas a la de la luz en presencia de un campo magnético (el mismo método que se usa para estudiar los chorros expulsados por los agujeros negros en los núcleos de galaxias).

Se trataba de un método innovador, ya que hasta entonces se creía que los chorros de las estrellas en formación, a pesar de alcanzar velocidades de hasta mil kilómetros por segundo, eran demasiado lentos para acelerar electrones a velocidades próximas a la de la luz y, por lo tanto, para producir radiación sincrotrón. Pero en HH 80-81 hallamos un campo magnético con características muy similares a las encontradas en los chorros de los núcleos activos de galaxias, lo que nos acercaba a un modelo unificado para todos los objetos astronómicos. Un modelo que requiere que exista acreción de materia desde un disco a un objeto central, y que parte del material se expulse formando unos chorros, cuya estructura viene definida por las líneas de campo magnético.

Conocimos, gracias a este trabajo, que en el cosmos funcionan mecanismos similares a pequeña y gran escala. Sin embargo, otros escenarios se encuentran, aún, envueltos en incertidumbre. Existe un debate, desde hace décadas, sobre los caminos que llevan a la formación de las estrellas. Mientras que el proceso de nacimiento de estrellas pequeñas, como el Sol, parece asentado y plantea pasos claros —colapso de fragmentos de nubes interestelares, acumulación en el centro, formación de un embrión estelar, expulsión de chorros y formación de un disco de gas y polvo en torno al embrión—, el nacimiento de estrellas muy masivas seguía siendo un misterio en muchos aspectos, y había defensores tanto del modelo de acrecimiento como del de fusión de estrellas más pequeñas.

En este contexto hemos podido aportar algo de claridad. En 2005 participábamos en el hallazgo de un disco de gas y polvo en torno a una estrella muy joven, con una masa quince veces mayor que nuestro Sol, que apoyaba la hipótesis de que todas las estrellas, incluso las más grandes, se forman mediante un proceso similar al que, hace ahora 4500 millones de años, dio lugar al Sistema Solar. Y en 2023 apuntalábamos este resultado con la obtención de la imagen más precisa de la protoestrella masiva NIRS3, que no solo parece sugerir que, en efecto, todas las estrellas se forman igual, sino que indica que esta estrella alterna episodios de acumulación y expulsión de material. La detección de un estallido de acrecimiento en NIRS 3 constituye uno de los indicios más sólidos de que, en efecto, todas las estrellas se forman de manera similar.

Estas estrellas masivas, que culminan su vida en explosiones de supernova, son objetos escasos, pero influyen de modo determinante en la estructura y evolución de las galaxias (son, además, las responsables de la existencia de, entre otros, algunos de los elementos que nos componen). En el IAA hemos desarrollado trabajos enfocados en estas misteriosas gigantes, como el catálogo GOSS, dedicado a las estrellas de tipo O. Se trata de estrellas de entre dieciséis y más de cien masas solares, con luminosidades millones de veces superiores a la de nuestro Sol y tan escasas que en nuestro entorno galáctico solo una de cada dos millones de estrellas es de este tipo.

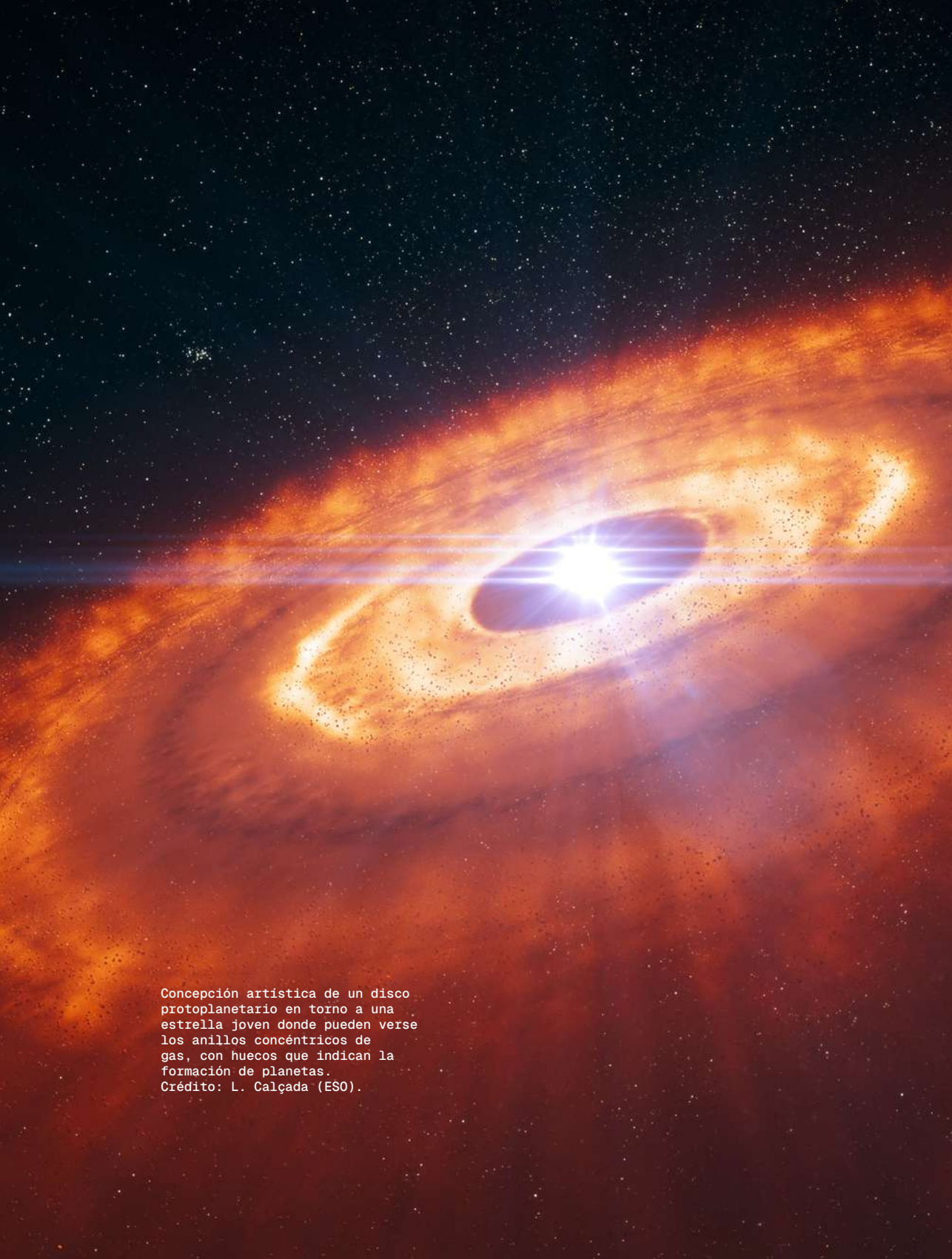
El catálogo GOSSS abrió una ventana a estos gigantes estelares, y en 2024 aportábamos una visión a muy alta resolución de la región de formación estelar AFGL 5180, cuna de numerosas estrellas masivas, que nos permitió realizar un censo estelar y reveló numerosos flujos de gas expulsados por las estrellas. Este trabajo mostraba el potencial de la observación en infrarrojo de regiones de formación de estrellas masivas, que permitan por fin discriminar entre los dos modelos que buscan explicar en qué entorno nacen las estrellas gigantes: el modelo competitivo, que predice que se forman en cúmulos muy concentrados rodeadas de protoestrellas de menor masa, y el modelo de acreción de núcleo, que plantea que las estrellas muy masivas pueden formarse tanto en aislamiento como en regiones estelares densas.

DISCOS Y FORMACIÓN DE PLANETAS

La formación de las estrellas nos lleva, necesariamente, a la de los planetas. La búsqueda de discos de gas y polvo en torno a estrellas jóvenes, germen de los sistemas planetarios, resulta fundamental para explicar los nuevos mundos observados. Se trata de un campo de investigación relativamente joven y que, en el Instituto de Astrofísica de Andalucía, afrontamos desde un punto de vista multidisciplinar, involucrando especialistas en formación de discos protoplanetarios, física estelar y Sistema Solar.

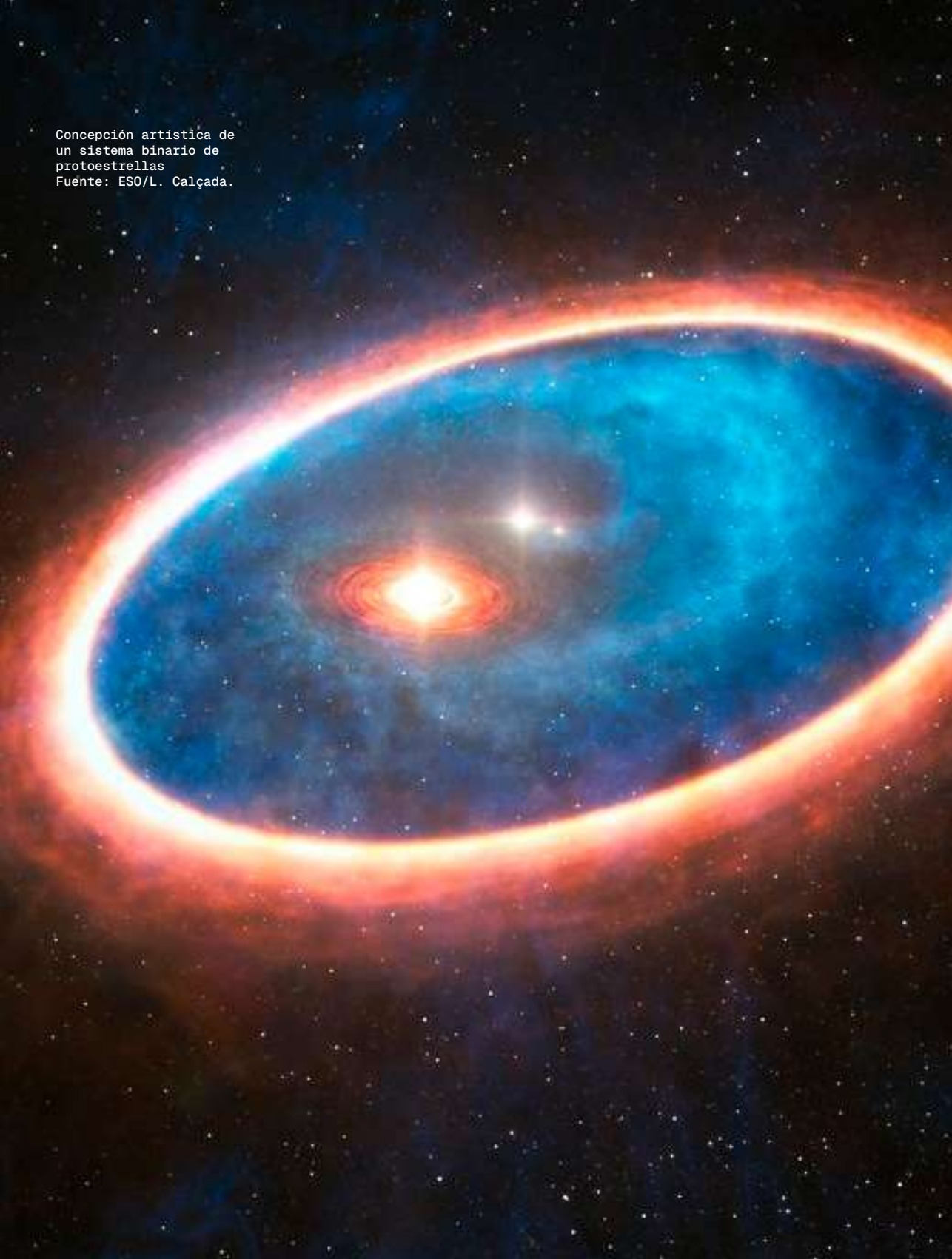
Los planetas se forman a partir de discos de gas y polvo que giran en torno a las estrellas jóvenes. Una vez formada la «semilla» del planeta, una pequeña acumulación de polvo, este irá agregando material y producirá un surco en el disco con la forma de su órbita. Esta etapa de transición entre el disco original y el sistema planetario es extremadamente difícil de estudiar y, por tanto, aún poco conocida. Sin embargo, en 2014 dirigíamos un revelador estudio en la estrella HD 169142.

HD 169142 es una estrella joven, dos veces más masiva que el Sol y cuyo disco se extiende unas 250 unidades astronómicas, o UAs (una unidad que equivale a la distancia media entre la Tierra y el Sol, 150 millones de kilómetros). Las observaciones en radio y en el infrarrojo, que trazan la presencia de granos de polvo microscópicos, mostraron dos surcos en el disco, uno en la región interna (entre 0.7 y 20 UAs) y otro más externo y menos desarrollado, entre 30 y 70 UAs. Esta estructura sugiere que el disco está siendo modificado por dos planetas u objetos subestelares, y constituye una de las primeras pruebas de formación planetaria halladas en un disco de transición.



Concepción artística de un disco
protoplanetario en torno a una
estrella joven donde pueden verse
los anillos concéntricos de
gas, con huecos que indican la
formación de planetas.
Crédito: L. Calçada (ESO).

Concepción artística de
un sistema binario de
protoestrellas
Fuente: ESO/L. Calçada.



Pero la imagen se complica, de nuevo, porque la mayoría de las estrellas forman sistemas binarios, en los que dos estrellas giran en torno a un centro común. Y nuestros modelos de formación planetaria, que sugieren que los planetas nacen por la lenta agregación de partículas de hielo y polvo en los discos protoplanetarios, suelen considerar solo estrellas aisladas, como el Sol. La pregunta es evidente: ¿afecta la existencia de una estrella compañera a la estructura del disco o a la formación de los planetas?

En 1998, un estudio en el que participaba el IAA halló que el objeto conocido como L1551 no era una única estrella joven, sino un sistema de dos estrellas muy próximas, con una distancia entre ellas similar a la que separa a Plutón del Sol. Y cada una de ellas presentaba un disco a su alrededor parecido a los observados en estrellas solitarias, solo que unas diez veces menor (una característica quizá impuesta por el efecto gravitatorio de la estrella compañera). Ambos discos contenían en torno a 0.05 masas solares, suficiente como para formar un sistema planetario, y este hallazgo supuso la confirmación de que los discos protoplanetarios pueden existir en sistemas estelares binarios.

Y en 2022 liderábamos una investigación que completaba la escena, gracias al estudio de la estrella doble SVS 13, aún en su fase embrionaria. Observamos que cada estrella presenta un disco de gas y polvo a su alrededor y que, además, se está formando un disco mayor alrededor de ambas: un disco con forma espiral que alimenta de materia a los discos individuales. El trabajo, que constituía la mejor descripción disponible hasta el momento de un sistema binario en formación, concluía que en todos ellos podrían formarse en el futuro sistemas planetarios.

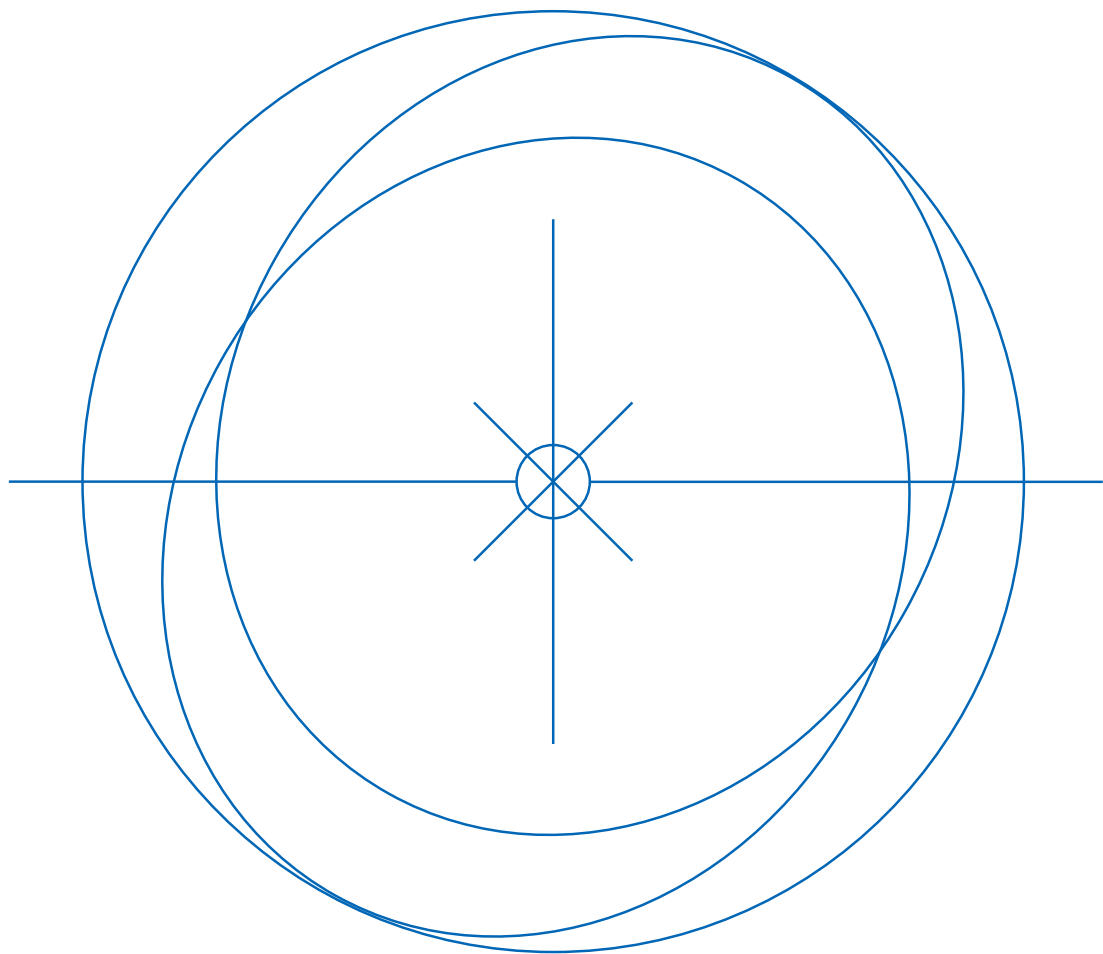
La duración media de los procesos astrofísicos provoca que, en ocasiones, deseemos disponer de un método para rebobinar o avanzar de forma acelerada. Algo imposible, por supuesto, aunque se han concebido distintos atajos: nuestro rebobinado consiste, generalmente, en buscar objetos en un estadio evolutivo anterior, y el avance en el estudio de objetos evolucionados. Pero en 2016 coordinábamos el hallazgo, desde el IAA, de un disco de formación planetaria en miniatura que representaba un atajo alternativo.

El descubrimiento tuvo lugar en torno a la estrella XZ Tau B que, con menos de cinco millones de años de edad, es tan joven que aún no ha terminado su proceso de contracción. Esta joven estrella está rodeada de un disco de gas y polvo con una cavidad central que parece haber sido creada por protoplanetas. Con un tamaño decenas de veces menor que nuestro Sistema Solar, la evolución del disco en torno a XZ Tau B será entre cincuenta y quinientas veces más rápida que en los sistemas mayores, de modo que podremos seguirlo en tiempo real.

Tomemos, ahora, uno de esos atajos para avanzar aceleradamente y atisbar el futuro de las estrellas y sus sistemas planetarios: para contemplar los dramáticos finales que producen nuevos, bellos y asombrosos objetos.

D.

**EL MEDIO
INTERESTELAR**



**Y LA MUERTE DE
LAS ESTRELLAS**

Las estrellas, en su proceso de formación, toman del medio interestelar el material necesario hasta que el núcleo alcanza la temperatura suficiente para desencadenar reacciones nucleares y comienzan a brillar. Esto se considera el inicio de su etapa adulta, cuya duración depende de lo que tarde la estrella en agotar el hidrógeno, lo que, a su vez, depende de la masa: como veíamos unas páginas atrás, una estrella mediana como el Sol vivirá unos 10 000 millones de años en esta fase, mientras que una estrella con diez masas solares lo hará solo unos cien millones de años.

Al agotarse el hidrógeno, la estrella comienza a hundirse bajo su propio peso, proceso que calienta las capas externas, que se dilatan y expanden. La estrella aumenta su radio y comienza la etapa de gigante roja, momento en el que las historias de las estrellas siguen distintos caminos.



NEBULOSAS PLANETARIAS

En el caso de estrellas de masa intermedia comienza a quemarse helio en el núcleo, mientras la dilatación de la envoltura continúa hasta que el núcleo pierde control sobre ella y se expande, libre, en el espacio. El núcleo, una estrella enana blanca muy caliente, produce radiación ultravioleta y un viento estelar que, al interactuar con el material de la envoltura, hacen que emita luz. Así se genera un bellissimo fenómeno astrofísico, una nebulosa planetaria.

Todas las estrellas de menos de diez masas solares (incluido el Sol) culminan sus vidas como nebulosas planetarias, pero aún no conocemos muchos detalles de esta breve pero importante etapa final. Por ejemplo, un estudio coordinado por el IAA mostraba en 2015 que este escenario, que se concebía como un proceso tranquilo, podía tener componentes explosivos.

Igualmente, investigaciones desarrolladas en el centro han puesto de manifiesto procesos en la muerte de las estrellas de masa intermedia que implican el renacimiento de las estrellas. Como el caso de Abell 78, una nebulosa que se formó según el modelo conocido, pero que con el tiempo desarrolló reacciones termonucleares en su capa superficial de hidrógeno; estas reacciones produjeron la eyección de parte del material de las capas externas y una dilatación tal que la estrella volvió atrás y retomó las características de una gigante roja.

Algo similar le ocurrió a HuBi1, una nebulosa planetaria con, en apariencia, la típica estructura de las planetarias, una envoltura de gas difusa exterior y un cascarón central brillante. Pero un trabajo liderado por el IAA revelaba una estructura de ionización invertida cuya región interna, más fría que la externa, desafiaba las leyes básicas de la termodinámica y que apuntaba a un epi-

sodio peculiar en su evolución: la estrella central de HuBi1, en lugar de apagarse progresivamente, revivió gracias a un pulso térmico tardío que fusionó el helio de su superficie.

Las nebulosas planetarias constituyen un bellissimo ejemplo de interacción de vientos estelares, donde flujos de gas a distintas temperaturas y velocidades producen una característica estructura: una cavidad central compuesta por un viento muy veloz y caliente, un cascarón brillante formado por un viento más denso y frío, y una envoltura externa. Entre las dos primeras debería existir, según los modelos, una capa de transición que transmite el calor producido por el choque de vientos, como confirmó un estudio coordinado por el IAA en 2013. Se detectó en NGC 2392, una de las nebulosas planetarias más icónicas que, además, revelaba una posible compañera de la estrella central. En 2019 estudiamos su variabilidad periódica en rayos X y, nuevamente, los datos sugerían que se trata de un sistema estelar binario (o múltiple).

NGC 2392, esta nebulosa con melena de león, impulsó un cambio de paradigma sobre estos objetos. Hasta hace unas décadas se creía que las morfologías de las nebulosas planetarias se debían a la interacción de vientos estelares lanzados en dos fases evolutivas diferentes, un modelo que no explicaba las formas asimétricas o multipolares de algunas de ellas. A mediados de los años ochenta se descubrió lo que se llamó un «flujo bipolar» de alta velocidad en NGC 2392, que representaba el primer indicio de un chorro de material en una planetaria. En 2021, un estudio encabezado por el IAA conseguía trazar ese chorro hasta su estrella central y demostraba que el proceso de lanzamiento del chorro sigue aún activo.

Ahora sabemos que chorros de material, muy veloces y colimados, y que se forman al final de la vida de la estrella, podrían interaccionar con la envoltura expulsada en etapas anteriores y dibujar diversas y hermosísimas morfologías. También existen indicios que sugieren que, en el origen de las formas bipolares y multipolares, se hallan sistemas dobles de estrellas. Uno de ellos llegó de la mano de lo que se conoce como «fuentes de agua», estrellas en una etapa de transición entre las gigantes rojas y las nebulosas planetarias.

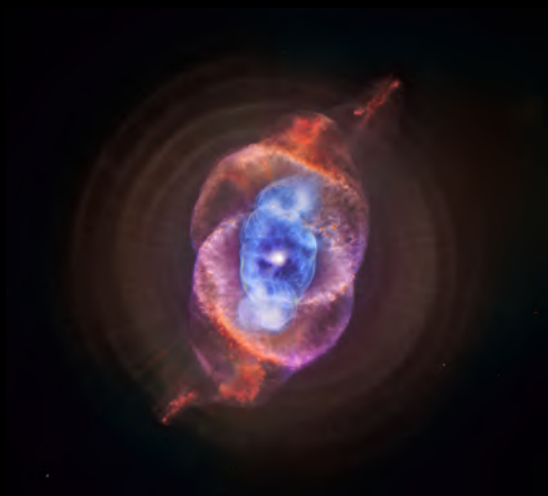
Entre los 100 000 millones de estrellas de la Vía Láctea, solo hemos identificado quince fuentes de agua, pero estos quince objetos han hilvanado una línea de investigación asombrosa en la que hemos tenido la suerte de participar.

En 1997 se halló K3-35, un objeto de naturaleza dudosa: podía tratarse de una nebulosa planetaria o de una estrella aún en proceso de formación. En 1998, el IAA coordinaba un estudio que demostraba que K3-35 era, en efecto, una nebulosa planetaria, lo que suponía un problema. Otro equipo científico había detectado en ella un tipo de emisión muy intensa producida por el vapor de agua, un más de agua, incompatible con esta conclusión: aunque las moléculas de agua son abundantes en las gigantes rojas, al entrar en la fase de nebulosa planetaria el vapor de agua debería destruirse. K3-35, una nebulosa extremadamente joven, se convirtió en la primera planetaria descubierta con este tipo de emisión, e inauguró el estudio de las fuentes de agua.

En 2020 observábamos una de ellas, W43A, en pleno proceso de metamorfosis hacia nebulosa planetaria. Detectamos un chorro bipolar de material a alta velocidad, que colisiona con el material circundante y esculpe un cascarón, también bipolar, en él. Capturábamos así el momento en el que se pierde la simetría esférica y se desarrolla una morfología compleja, a partir de las cavidades que los chorros excavan en el material expulsado por la estrella en etapas anteriores.

La nebulosa planetaria NGC2392.
Crédito: NASA, ESA, Andrew Fruchter (STScI),
and the ERO team (STScI + ST-ECF).





Arriba: nebulosa de la Hormiga (Menzel 3) y nebulosa de la Hélice (NGC 7293).
 Debajo: nebulosa del Ojo de Gato (NGC 6543) y nebulosa de la Mariposa (NGC 6302).
 Créditos: NASA/CXC/SAO, NASA/STScI / NASA, ESA, and C.R. O'Dell (Vanderbilt University) /
 NASA, ESA & the Hubble Heritage Team (STScI/AURA) / NASA, ESA, Joel Kastner (RIT).

En este trabajo planteábamos también la posible existencia de una estrella compañera que vertería material sobre la moribunda, un porcentaje del que sería expulsado a través de los chorros.

Y en 2021 confirmábamos que, en efecto, las quince fuentes de agua conocidas son estrellas dobles, y vimos además que todas habían pasado por un episodio en el que, al evolucionar una de las estrellas y convertirse en gigante roja, engulle a su compañera y comparten envoltura. Estas fuentes de agua no eran, como pensábamos, estrellas más masivas que el Sol, con entre cuatro y ocho masas solares, sino estrellas de tipo solar que atravesaron una fase de capullo, o envoltura común, con su compañera.

En unas decenas de miles de años después de su formación, las planetarias se dispersan en el medio interestelar. Pero, aunque a día de hoy se conocen más de 3500, la carencia de observaciones adecuadas de muchas de ellas impide situarlas en un contexto evolutivo general. Y continuamente aparecen o caracterizamos objetos de este tipo que no responden a los patrones conocidos, muchos de ellos relacionados, posiblemente, con estrellas compañeras.

Por ejemplo, en 2017 dirigíamos un estudio de la nebulosa K4-37, que mostraba distorsiones en los lóbulos bipolares y una configuración en tres ejes cuya formación requería la intervención de varias eyecciones bipolares y en distintas direcciones. Unas morfologías que parecían apuntar a una estrella compañera que no hemos podido observar aún.

Lo mismo ocurre en el caso de IC 4997, que presenta una variación con un periodo de unos cincuenta o sesenta años. Dado que estos objetos terminarán por extinguirse y desaparecer, se espera que todas las nebulosas planetarias sean variables, pero en 2022 sugeríamos desde el IAA que esta variación podría estar relacionada, nuevamente, con una estrella que orbita alrededor de la estrella central.

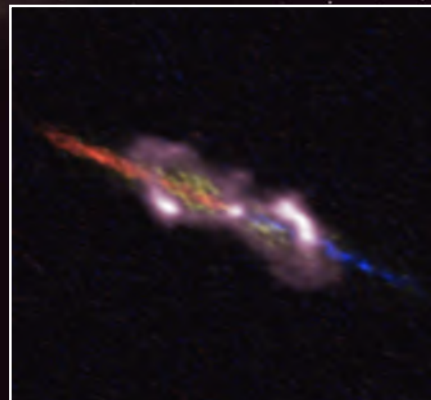
Y, mientras que algunas varían, otras se rompen. En 2012 estudiábamos la nebulosa NGC 6778, una planetaria cuya estrella central es en realidad un sistema de dos estrellas tan próximas que, al igual que las fuentes de agua, llegaron a compartir envoltura. La nebulosa muestra una forma de S dibujada por los flujos de material, cuyos extremos distan mucho de la región central, donde se aprecia un anillo ecuatorial muy fragmentado y sendos lóbulos bipolares, también con indicios de ruptura. El estudio concluía que su forma pudo verse significativamente alterada debido a un evento explosivo y a la formación de flujos de material a alta velocidad, que produjeron la ruptura del «cascarón» de la nebulosa y de su anillo ecuatorial.

Terminamos este epígrafe con un escenario aún más complejo que una estrella doble. Con un baile de, nada menos, cuatro o cinco estrellas. En 2022 colaborábamos en un estudio que revelaba que la nebulosa del Anillo Sur presenta posiblemente tres estrellas hasta ahora invisibles —la estrella central es un sistema binario—, que produjeron las formas oblongas y curvas de la nebulosa. El estudio proponía que, antes de que la estrella moribunda se desprendiera de sus capas, interactuó con una o incluso dos estrellas compañeras más pequeñas. Durante este baile, las estrellas podrían haber lanzado chorros en direcciones opuestas, que más tarde se plasmaron como las proyecciones aproximadamente emparejadas que ahora se observan en los bordes de la nebulosa.

Los caminos para convertirse en nebulosa planetaria son, parece, mucho más numerosos de lo que pensábamos hace pocas décadas.



Imagen de W43A, una estrella envejecida en plena metamorfosis. Se observa el chorro bipolar (en azul) que emerge de la estrella central, un flujo de material a baja velocidad (verde) y las nubes de polvo arrastradas por los chorros (naranja).
Crédito: ALMA (ESO / NAOJ / NRAO), Tafoya et al. De fondo, concepción artística del objeto.

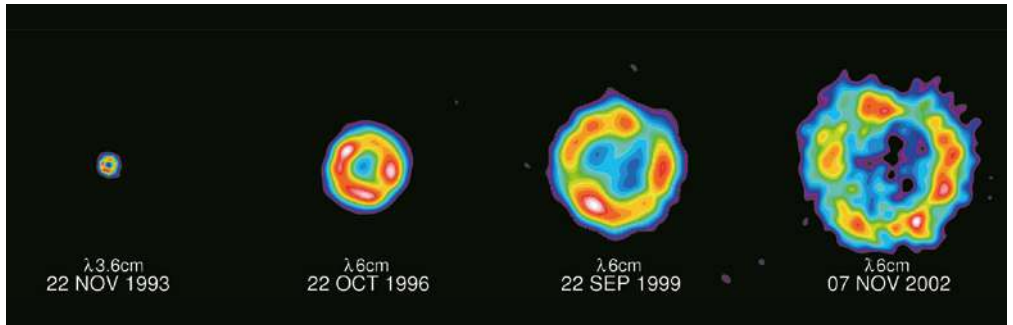


ESTRELLAS MASIVAS. SUPERNOVAS

Ahora, ¿qué ocurre con las estrellas muy masivas?

Entramos en un terreno explosivo que involucra una enorme liberación de energía, el de las supernovas. Al contrario que las estrellas pequeñas y medianas, las estrellas con más de ocho masas solares sí pueden fusionar elementos más pesados tras agotar el hidrógeno del núcleo, y forman una estructura similar a la de una cebolla: las capas más externas albergan hidrógeno y helio y, a medida que avanzamos hacia el núcleo de la estrella, encontramos carbono, nitrógeno, oxígeno y elementos cada vez más pesados. Hasta el hierro. El núcleo estelar no puede fusionar hierro, de manera que la estrella deja de producir energía y las capas externas colapsan, lo que produce una explosión cuyo brillo puede competir con el de la galaxia que la alberga. Este proceso genera dos objetos igualmente extremos: una estrella de neutrones (o púlsar) o un agujero negro, que constituyen versiones póstumas del núcleo estelar y muestran densidades extremas (en el caso de los agujeros negros, tan extrema que ni la luz puede escapar de su atracción gravitatoria).

Para entender estas violentas explosiones nos vamos a 1993, año en el que estalló una de las supernovas mejor observadas en la historia. Su estudio, que se extendió durante más de quince años, permitió caracterizarla en detalle y seguir su evolución hasta la fase de remanente de supernova (una nebulosa formada por el material expulsado que se expande e interactúa con el medio). Un equipo científico encabezado por el IAA detectó por



SN 1993J. Expansión de SN 1993J desde 1993 hasta 2002.

Crédito: J.M. Marcaide et al. Actas del congreso "Cosmic Explosions, On the 10th Anniversary of SN1993J".

primera vez la estructura de tipo cáscara esférica para una supernova joven, una estructura propuesta por los modelos teóricos que establecían que la emisión en radio se debía al choque entre el material expulsado de la supernova y el medio en torno a la estrella.

Este estudio permitió obtener la primera película de la expansión angular de una supernova, que revelaba que mantiene un alto grado de circularidad a lo largo de toda su vida. En 2009, seis mil días después de su explosión, SN 1993J se había convertido en una supernova muy débil y el medio circunestelar se había vuelto transparente para la supernova en expansión. SN 1993J comenzaba la transición de supernova de radio a remanente de supernova, donde su evolución sería gobernada por la interacción con el medio interestelar.

Y, si bien con esta supernova logramos obtener una película completa, en el caso de SN 2023ixf pudimos, en una colaboración internacional, detectarla apenas una hora después de explotar. Se trata de la detección más temprana de una supernova provocada por el colapso del núcleo de la estrella, y los datos revelaban que la estrella había expulsado grandes cantidades de polvo en los años previos a su muerte, lo que originó una densa nube que atenuó el primer destello de luz de la explosión.

Pero las supernovas no solo se producen por el colapso de una estrella muy masiva. Existe otra versión de estos fenómenos que involucra un sistema doble de estrellas, las supernovas de tipo Ia. Estas explosiones 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 (siempre contienen una enana blanca, pero se ignoraba cómo era su compañera). En 2023 participábamos en el estudio que aportó luz al respecto: la primera observación en radio de una supernova de tipo Ia confirmaba que procede de un sistema doble de estrellas formado por una enana blanca y una estrella de tipo solar.

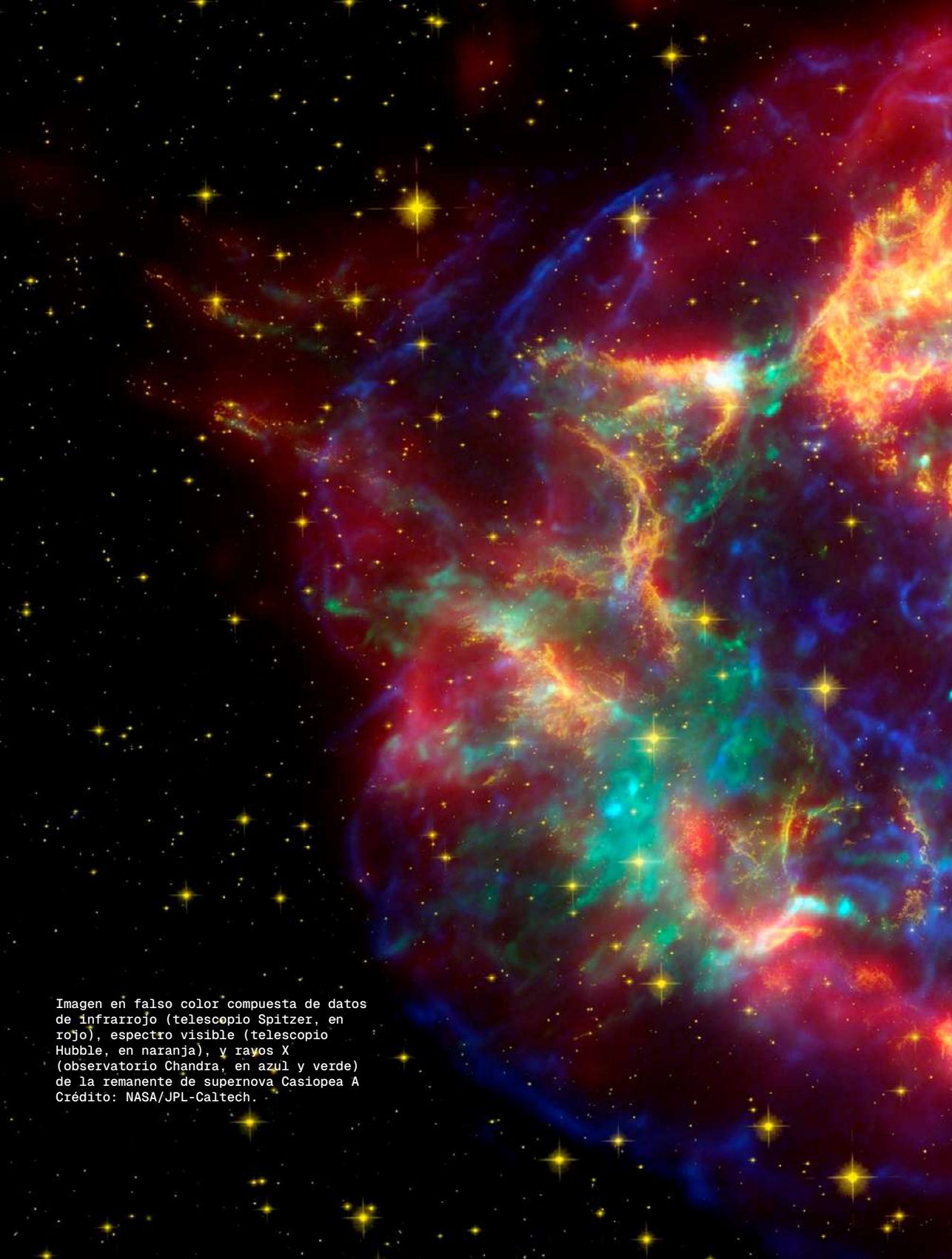
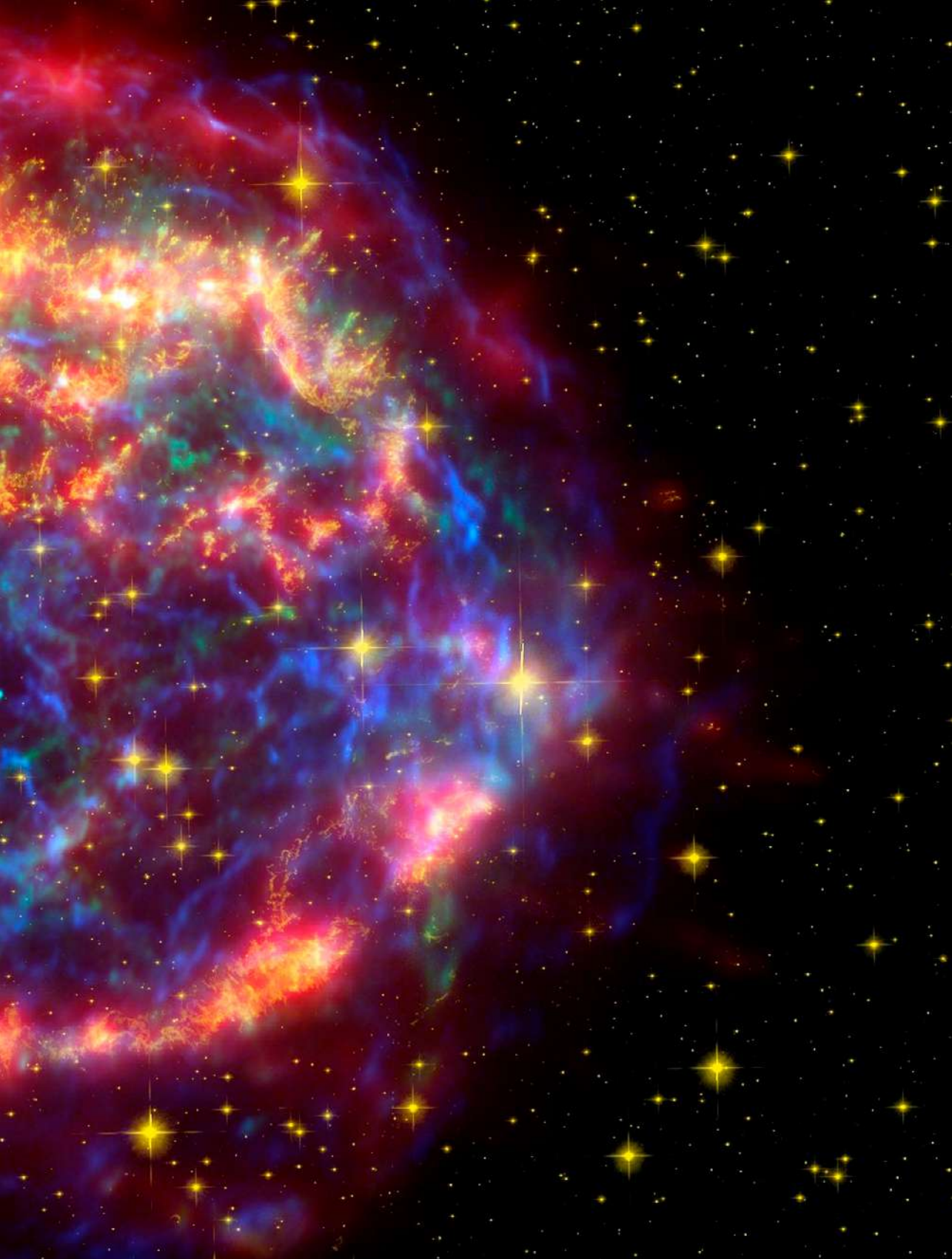


Imagen en falso color compuesta de datos de infrarrojo (telescopio Spitzer, en rojo), espectro visible (telescopio Hubble, en naranja), y rayos X (observatorio Chandra, en azul y verde) de la remanente de supernova Casiopea A
Crédito: NASA/JPL-Caltech.



Siguiendo la senda de objetos por los que vamos transitando, donde las excepciones a la norma resultan habituales, las explosiones de supernova no iban a ser menos. De hecho, algunas estrellas se comportan como supernovas «impostoras», al mostrar explosiones muy intensas que, sin embargo, no representan el fin de la estrella. Este podría ser el caso de uno de nuestros objetos de estudio, SN 2015bh, una estrella que en 2017 llevaba veintiún años sufriendo erupciones y que, junto con otros objetos similares, podría requerir una nueva clasificación. Se trata de una estrella de tipo variable luminosa azul que mantiene dos tipos de variabilidad: erupciones regulares, tras las que la estrella regresa a su estado anterior, y erupciones gigantes, que hacen que sufra transformaciones (un caso paradigmático de este tipo es el de Eta Carina, una estrella que ha perdido más de cuarenta veces la masa del Sol a través de erupciones y viento solar).

Algunas de estas estrellas sufren erupciones aún mayores, cuya huella es similar a la de una explosión de supernova. La línea que separa estas supernovas impostoras y las verdaderas resulta muy fina y es aún objeto de debate, pero nuestro estudio de SN 2015bh sugería que una erupción tan violenta podría ser la vía rápida para que las estrellas luminosas azules transiten a su fase evolutiva final, la de Wolf-Rayet, que requiere que se desprendan de su envoltura.

Además de los procesos individuales que conducen a las explosiones de supernova, en el IAA también estudiamos su influencia en el entorno, en ese medio interestelar donde nacen y mueren las estrellas. En este sentido, han sido muy reveladores los estudios de dos regiones que se consideran factorías de supernovas, o lugares donde la media de este tipo de eventos es altísima. En 2009 descubríamos en las regiones centrales de la galaxia IC 694 un total de veintiséis fuentes, correspondientes en su mayoría a supernovas de radio jóvenes y a remanentes de supernova, que como hemos visto constituyen diferentes estadios evolutivos del mismo fenómeno.

Sabemos que IC 694, conocida también como Arp 299-A, se encuentra en los inicios de un proceso de fusión con otra galaxia menor, interacción que produce una violenta inyección de gas y que desencadena, sobre todo en IC 694, intensos brotes de formación estelar. Y dichos estallidos producen, lógicamente, una tasa de mortalidad estelar superior a la media, que hemos podido estudiar casi en tiempo real. Si en una galaxia como la Vía Láctea se espera una supernova cada cincuenta años, se estima que en IC 694 se produce alrededor de una por año.

En el IAA llevamos años investigando esta galaxia, de modo que hallar nuevas explosiones no resulta una sorpresa. Sí lo fue detectar un flujo de material de enormes dimensiones, que se extiende más de 9000 años luz y que libera un mínimo de diez masas solares por año a una velocidad de entre 370 y 890 kilómetros por segundo. Una estructura que, según comprobamos, esculpe la actividad generada por las estrellas, sobre todo por las explosiones de supernova.



El par de galaxias en interacción Arp
299-A, una factoría de supernovas.
Crédito: NASA, ESA, the Hubble Heritage
(STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration,
and A. Evans (U. Virginia,
Charlottesville/NRAO/Stony Brook U.)

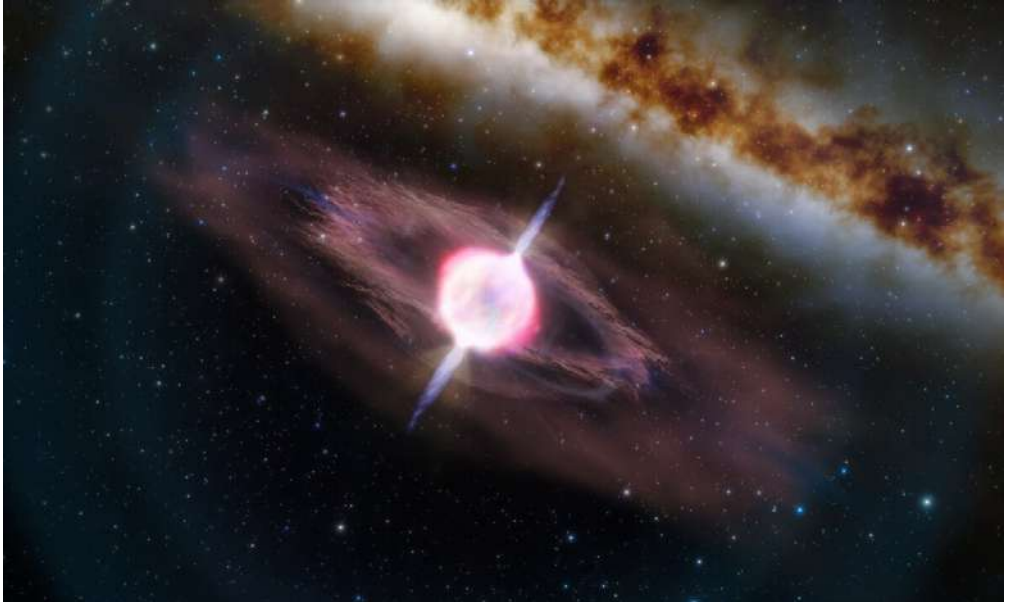
LAS EXPLOSIONES RÉCORD

Cuando el Instituto de Astrofísica de Andalucía comenzó su andadura hace medio siglo, la historia de las supernovas terminaba, más o menos, en las líneas anteriores: en esa explosión que brillaba más que su galaxia y que dejaba un remanente a su paso. Pero hay más, mucho más: ahora también hablamos de hipernovas, kilonovas y explosiones de rayos gamma. Desde el IAA hemos podido alumbrar las zonas oscuras de este nuevo escenario y, también, recopilar nuevos datos que nos obligan a modificar los modelos sobre la muerte de las estrellas muy muy masivas.

En 1967, la serie de satélites espía norteamericanos Vela, diseñados para verificar que la URSS cumplía los tratados de no proliferación de armas nucleares, registró una serie de explosiones de rayos gamma —el tipo de radiación más energética del espectro— que procedían del espacio. Este casual descubrimiento abrió uno de los grandes enigmas de la astrofísica del siglo XX que, bajo el nombre de GRBs —del inglés *Gamma Ray Bursts*, o explosiones de rayos gamma—, constituye uno de los fenómenos más energéticos del universo.

Su origen fue objeto de un intenso debate hasta la década de los noventa: algunas teorías aseguraban que las explosiones de rayos gamma se producían en el universo lejano, en tanto que otras señalaban a un origen próximo, dentro de la Vía Láctea. La primera identificación en tierra de un GRB en 1997 cerró el debate: las explosiones procedían de galaxias muy lejanas, a miles de millones de años luz, lo que implicaba que eran los objetos más violentos del universo (la energía liberada por uno de ellos equivale a la que emiten mil estrellas como el Sol a lo largo de sus 10 000 millones de años de vida).

Los GRBs son intensos destellos de rayos gamma con una duración de entre una centésima de segundo y varios minutos, y constituyen fenómenos tan impredecibles como escurridizos. Sin embargo, la observación con grandes telescopios en tierra y la combinación de la observación con satélites y telescopios robóticos —como los de red BOOTES, desarrollada por el IAA y que cuenta con telescopios en los cinco continentes— comienza a aportar luz a un fenómeno que, hace apenas pocas décadas, era una absoluta incógnita.



Concepción artística de una explosión de rayos gamma, producida por el colapso de una estrella masiva. Crédito: International Gemini Observatory/NOIRLab/NSF/AURA/J. da Silva.

En enero de 1999, cuando aún se desconocían la naturaleza y muchas propiedades físicas de los GRBs, aconteció un intensísimo estallido. Fue el primer GRB en el que se observó la contrapartida del estallido en luz visible, y cuyo estudio se lideró desde el IAA. Obtuvimos datos en todo el espectro electromagnético y pudimos concluir que el cataclismo cósmico aconteció a unos 9000 millones de años luz, lo que implicaba que fue el objeto más luminoso del universo observado hasta la fecha: la noche se hubiera convertido en día de haberse hallado en nuestra galaxia.

No solo son eventos complejos y esquivos, sino también algo indisciplinados: la clasificación tradicional distinguía GRBs cortos, producidos por la fusión de dos objetos compactos y de pocos milisegundos de duración, y largos (provocados por el colapso de una estrella muy masiva y de hasta media hora de duración). Pero esta clasificación está, como veremos enseguida, tambaleándose.

Las explosiones largas de rayos gamma (LGRBs, del inglés *Long Gamma Ray Bursts*) se producen cuando estrellas muy masivas agotan su combustible y explotan como supernovas. Pero no todas las supernovas generan GRBs y, al contrario de lo que se creía, ambos fenómenos se originan en entornos galácticos diferentes. En 2006 participábamos en un trabajo que demostró que, a diferencia de las supernovas, las explosiones largas de rayos gamma se concentran en las regiones más brillantes de las galaxias y su distribución se restringe a galaxias débiles e irregulares. Esto sugería que los LGRBs se asocian con las estrellas de más alta masa y con las galaxias de menor evolución química y, además, implicaba que estos fenómenos apenas ocurren en galaxias como la Vía Láctea.

Y, aunque se conocía que estos fenómenos eran precursores del nacimiento de los agujeros negros estelares, hasta 2014 no detectamos la firma inequívoca de su formación, la polarización circular en su luz, que remite a los instantes posteriores al nacimiento de un agujero negro. Las estrellas que producen GRBs, además de muy masivas, giran muy rápidamente sobre sí mismas, lo que genera peculiaridades: su implosión no se produce de forma radial, como un globo al deshincharse, sino que sigue una forma espiral similar a la que dibuja el agua en un sumidero. Además, su luz se emite a través de dos chorros alineados con el eje de rotación que presentaba la estrella moribunda. Pero, más importante aún, estas estrellas presentan un campo magnético muy intenso. Y, durante el derrumbe, el campo magnético también se arremolina en torno al eje de rotación de la estrella, reforzándose.

Todo este complejo escenario predice una ineludible firma: producto de este géiser magnético, la luz visible emitida a través de los chorros debe estar polarizada circularmente. Y esto es, precisamente, lo que un equipo científico en el que participaba el IAA halló en GRB 121014A: los efectos que el nacimiento de un agujero negro provoca en su entorno.

¿Cómo sería, entonces, el escenario completo? Veamos: cuando una estrella muy masiva agota el hidrógeno que le sirve de combustible, su núcleo colapsa y se forma un agujero negro. A medida que la materia se arremolina en torno al agujero negro, parte de ella escapa a través de dos potentes chorros que se precipitan hacia el exterior casi a la velocidad de la luz en direcciones opuestas. Cada chorro perfora la estrella, produciendo una señal de rayos gamma que puede durar hasta varios minutos, mientras el chorro se aleja e interactúa con el gas circundante. Tras el estallido, la envoltura de la estrella se expande rápidamente en forma de supernova, pero solo se detecta un GRB cuando uno de estos chorros apunta hacia la Tierra.

Pero, como comentaba al presentar esta sección, las supernovas tienen hermanas mayores más energéticas, las hipernovas. En 1998 se detectaba la primera hipernova, una versión de las supernovas decenas de veces más intensa, que siguió a un estallido de rayos gamma y que supuso la primera evidencia de la conexión entre ambos fenómenos. El escenario propuesto para explicar el fenómeno involucra una estrella de más de veinticinco masas solares que, al agotar su combustible, sufre un proceso de colapso del núcleo.

Veinte años después, una investigación coordinada por el IAA aportaba una pieza clave para completar este relato que vincula las hipernovas y GRBs, al observar una envoltura caliente en torno al chorro en propagación: el chorro transfiere una parte importante de su energía a la envoltura y, si logra atravesar la superficie de la estrella, producirá la emisión de rayos gamma.

Sin embargo, el chorro puede malograrse dentro de la estrella y no emerger al medio al carecer de energía suficiente, circunstancia en la que se produce una hipernova, pero no un GRB.

Estos estallidos, que muestran emisiones de energía récord, también compiten en intensidad entre ellos. Y cuánto lleguen a brillar parece que podría depender de su entorno. En 2019 estudiamos un GRB con el récord en producción de fotones de muy alta energía, denominado GRB 190114C. Alcanzó el rango de los teraelectronvoltios (TeV), fotones un billón de veces más energéticos que los de la luz visible, y exigió contemplar nuevos mecanismos en la producción de energía en estos fenómenos.

Pero no solo eso: el estallido se produjo en la región central de una galaxia que se halla en proceso de interacción con otra algo mayor y muy próxima, un proceso que desencadena intensos brotes de formación estelar. No solo la galaxia anfitriona del GRB es más masiva de lo habitual en estos fenómenos, sino que el entorno inmediato de la estrella en colapso es también más denso que el que presentan de media este tipo de estallidos, algo que pudo ser crucial en la producción de los fotones ultraenergéticos detectados.

Y, por supuesto, en este campo tenemos también una sección de objetos discolos, que desafían nuestros modelos y exigen teorías nuevas. En 2021 estudiábamos una explosión que, con una duración de solo un segundo, batió un récord y alteró nuestro concepto de los GRBs: se trataba de la explosión más corta causada por la muerte de una estrella masiva. Su estudio mostró que la clasificación de estos estallidos según su duración no responde del todo a la realidad y abría nuevos escenarios en la muerte de las estrellas.

Este estallido, bautizado como GRB 200826A, pudo ser impulsado por chorros que apenas salieron de la estrella antes de apagarse, en lugar del caso más típico en el que los chorros emergen de la estrella y recorren grandes distancias produciendo un estallido de larga duración. El hallazgo ayudaba, no obstante, a resolver un viejo enigma: aunque los GRBs largos parecen estar asociados a supernovas, se detecta un número mucho mayor de supernovas que de GRBs largos, una discrepancia que persiste incluso considerando que los chorros de los GRBs deben apuntar hacia nuestra línea de visión para ser detectados. La conclusión a la que nos acercaba este trabajo sugiere que quizá, más a menudo de lo que pensábamos, los chorros se apagan.

Otro evento que no se comportó como debiera remite a una explosión ocurrida el día de Navidad de 2010 y cuyo estudio dirigimos desde el IAA. Además de una duración muy superior a la media, GRB 101225A mostró un resplandor posterior cuya causa, a diferencia del resto de GRBs, era de origen térmico. El estudio proponía que la explosión era el resultado de la fusión de una estrella de neutrones con una estrella gigante evolucionada. Este sistema binario exótico habría atravesado una fase de envoltura común cuando la estrella de neutrones se adentró en la atmósfera de la estrella gigante, que durante esta etapa perdió la mayor parte de su hidrógeno. Cuando ambas estrellas se fusionaron, la explosión produjo un chorro similar a los que se generan en los estallidos normales, pero con diferencias debidas a la interacción con la envoltura común preexistente.

El título de la nota de prensa que difundía este trabajo rezaba así: las estrellas han hallado una nueva forma de morir. Un titular que podríamos haber empleado en varias ocasiones: en 2022 colaboramos en el hallazgo de otro de esos eventos que nos obligan a reformular teorías más o menos asentadas. Al estudiar el estallido, denominado GRB 211211A, observamos indicios claros que apuntaban a una kilonova, producida en la fusión de dos estrellas de neutrones, y no a una supernova. Algo que no concordaba con su duración, de casi un minuto, que remite al segundo escenario.

Sabemos que la fusión de estrellas de neutrones producirá un estallido corto de rayos gamma (GRB), ondas gravitatorias y una kilonova, un fenómeno similar a las supernovas, pero cuya energía procede en parte del decaimiento de especies radiactivas, y que produce grandes cantidades de elementos pesados —de hecho, se cree que la mayor parte del oro y el platino en la Tierra se formaron como resultado de antiguas kilonovas—.

Además de contribuir a nuestra comprensión de las kilonovas y los GRBs, este descubrimiento proporcionó una nueva forma de estudiar la formación de los elementos pesados en el universo. Hasta hace poco existían discrepancias sobre lo que se conoce como proceso-r (o proceso rápido), que tiene lugar en eventos estelares explosivos y es responsable de la producción de la mitad de los elementos más pesados que el hierro, entre ellos el uranio y el oro. Aunque en un principio se pensaba que eran las supernovas la fuente de estos elementos, los últimos estudios favorecen las fusiones de estrellas de neutrones como principales productoras de los elementos más pesados.

Y, de hecho, dos años después, participábamos en un estudio que confirmaba el papel fundamental de las kilonovas en la producción de elementos pesados en el universo, especialmente los conocidos como tierras raras (lantánidos), elementos fundamentales en buena parte de nuestra tecnología actual.

Las fusiones de estrellas de neutrones, con sus GRBs y sus kilonovas, no solo nos han mostrado de dónde proceden el oro o las tierras raras, sino que un evento de este tipo inauguró una nueva era en la observación del universo. Una amplia colaboración internacional, en la que participó el IAA, llevó a cabo en 2017 la quinta detección de ondas gravitatorias, esas «arrugas» en el espaciotiempo producidas por el movimiento de objetos muy masivos, pero la primera en la que se localizaba y estudiaba la contrapartida en luz, o en ondas electromagnéticas.

El estudio combinado en ondas gravitatorias y electromagnéticas permitió establecer un cuerpo de conocimiento único de un objeto celeste: las ondas gravitatorias revelaron su masa, rotación, distancia y posición en el cielo, en tanto que la luz permitió estudiar su entorno (una galaxia envejecida que, posiblemente, se fusionó con otra en su pasado reciente), la hidrodinámica y la formación de elementos en el material expulsado.

Una investigación posterior, que implicaba el seguimiento de este fenómeno durante doscientos días y en la que también colaboramos, confirmaba que, tras la fusión, se produjo un chorro de partículas que atravesó la envoltura y se propagó a velocidades próximas a la de la luz. Este chorro mostraba tanta energía como la producida por todas las estrellas de nuestra galaxia durante un año entero, y el estudio sugería que más del 10 % de estas fusiones deberían producir chorros similares.

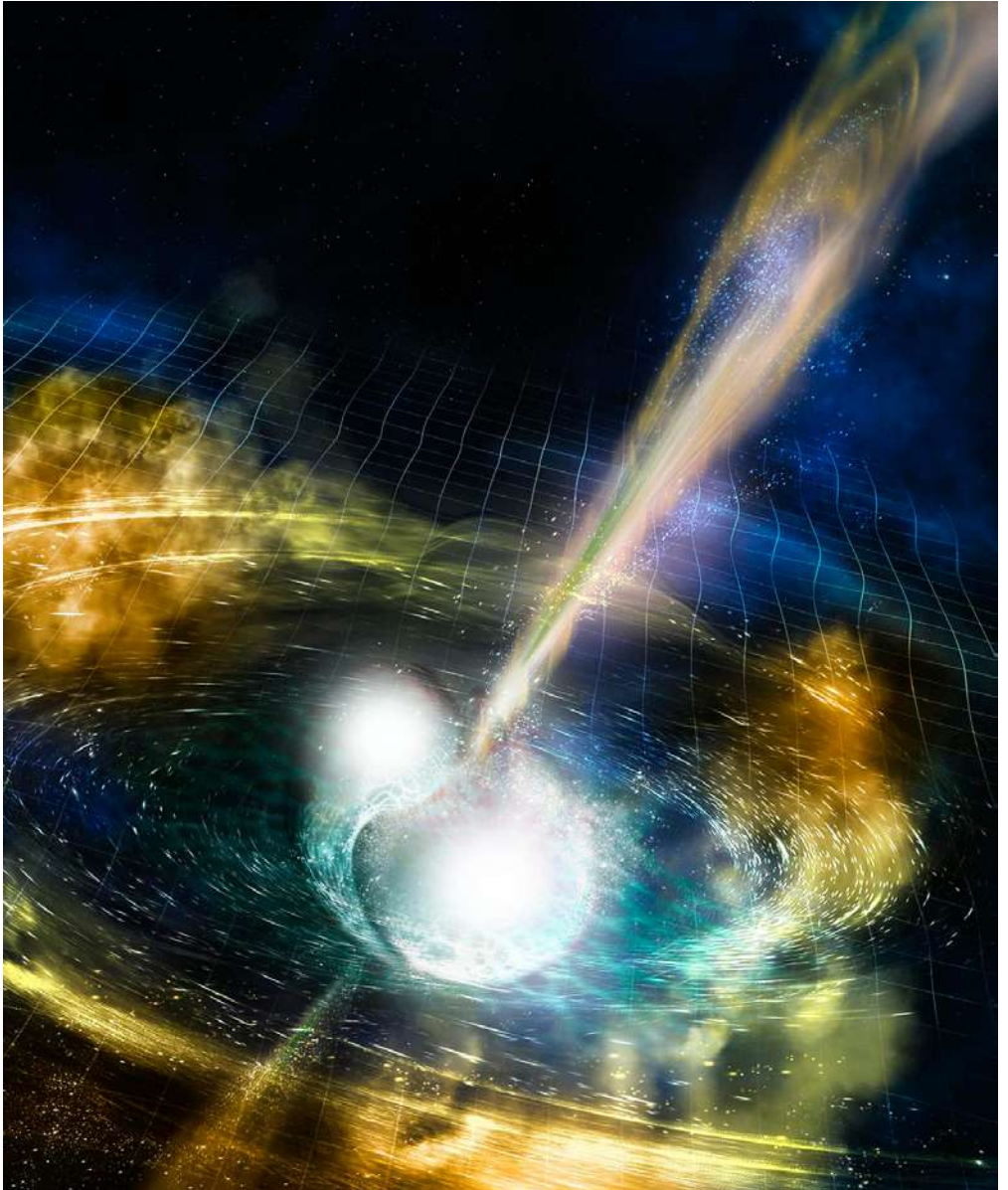


Ilustración de dos estrellas de neutrones en el momento de fusión. La cuadrícula muestra las ondulaciones en el espaciotiempo (las ondas gravitatorias), mientras que los haces de luz estrechos representan los estallidos de rayos gamma. Las nubes de material expulsado por las estrellas en la fusión brillan en varias longitudes de ondas, entre ellas el visible. Crédito: NSF/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet.

Hemos visto que los GRBs acompañan la formación de los agujeros negros estelares, y que estos objetos, que presentan un campo gravitatorio tan intenso que ni la luz puede escapar, constituyen el final de la trayectoria vital de las estrellas muy muy masivas. Sin embargo, existen mecanismos a través de los que estos objetos realimentan el medio interestelar, al expulsar, a través de chorros o estallidos, parte del material que queda atrapado en su disco de acrecimiento.

En 2020 participábamos en un estudio, a lo largo de seis meses, de la evolución del material expulsado por J1820, un sistema binario formado por un agujero negro y una estrella de tipo solar. En estos sistemas es habitual que el agujero negro absorba material de su compañera, que cae hacia el agujero negro a través del disco: en su caída, el material se calienta y el disco emite rayos X. Se trata de objetos muy variables, cuyo brillo depende de cuánto gas absorba el agujero negro; y, como generalmente acumula una cantidad muy pequeña de materia, no se suele ver. Sin embargo, ocasionalmente se producen erupciones, como en el caso de J1820 cuando lo observamos.

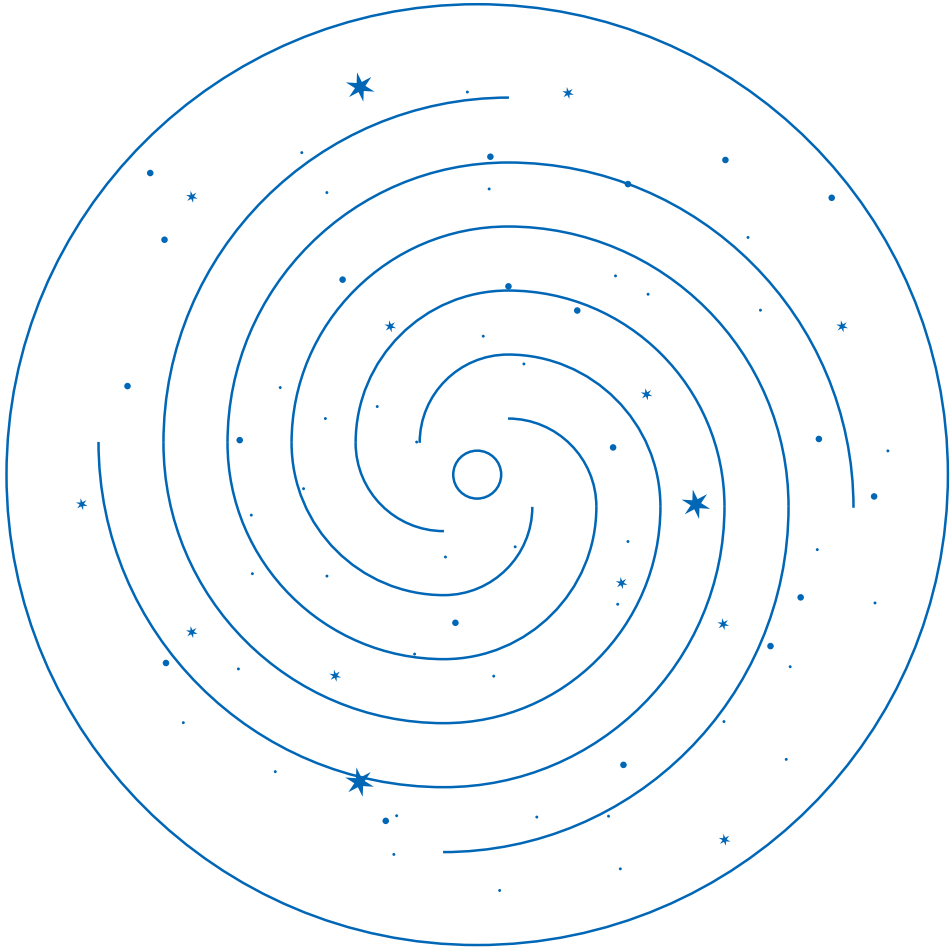
Cierro este capítulo con un hermoso recuerdo porque fue, precisamente, el final de una estrella masiva el protagonista de uno de los primeros artículos científicos publicado por el IAA. Bajo el título «Fotometría óptica de Cygnus X-1: 1972-1976», el estudio analizaba, con datos del modesto telescopio de treinta centímetros del Observatorio de Sierra Nevada (OSN), el brillo de Cygnus X-1, un objeto que hoy conocemos como una binaria de rayos X, un sistema formado por un agujero negro y una estrella supergigante azul. «La naturaleza del objeto secundario en el sistema binario de 5.6 días HDE 226868 (Cygnus X-1) es de importancia filosófica, ya que posiblemente sea un “agujero negro”», rezaba el comienzo de aquel primer artículo, testigo de unos emocionantes comienzos.

Los agujeros negros estelares, como Cygnus X-1, se consideran versiones en miniatura de los agujeros negros supermasivos que se hallan en los núcleos de las galaxias, de modo que sigamos el hilo y vayámonos, pues, a las galaxias.

Veamos sus discos, sus cúmulos estelares, sus halos de materia oscura, su historia... y sus monstruosos agujeros negros centrales.

E.

LAS
GALAXIAS



LA VÍA LÁCTEA

Las galaxias generalmente se definen como conjuntos de estrellas, gas y polvo que se mantienen unidos por la fuerza de la gravedad. Pero esta es la definición muy breve: si entramos en detalle habría que hablar de materia oscura, campos magnéticos, agujeros negros supermasivos, rayos cósmicos, de los distintos tipos de galaxias —espirales, elípticas e irregulares, cada una con características muy concretas—, de galaxias jóvenes o viejas, de galaxias perturbadas por la interacción con otras... y un largo etcétera.

La nuestra, la Vía Láctea, es una galaxia espiral que contiene entre 100 y 400 000 millones de estrellas y que forma parte del cúmulo de galaxias llamado Grupo Local, que incluye también a Andrómeda y otras treinta galaxias de menor tamaño. Su interacción con las galaxias vecinas constituyó la pista inequívoca para dilucidar su origen: la Vía Láctea se formó por la fusión de varias galaxias enanas y no lleva una vida apacible y aislada, sino que sigue en proceso de construcción. La evidencia definitiva se halló en 1994, escondida tras las densas regiones centrales de la Vía Láctea. Se trata de la galaxia enana de Sagitario, que gira en torno a la Vía Láctea y que, se anticipa, no sobrevivirá una órbita más y se fusionará con ella en unos 750 millones de años.

En 2001, un estudio mostró que Sagitario se encuentra en un avanzado proceso de desintegración, que se manifiesta en el desarrollo de una extensa corriente de marea —ríos de estrellas que se mueven a lo largo de su órbita— que envuelve nuestra galaxia en una órbita polar. Los modelos teóricos de esta corriente predecían que su cola norte dibujaba un bucle cerrado y se precipitaba casi verticalmente sobre el disco de la Vía Láctea, y un estudio, coliderado desde el IAA y publicado en 2007, aportó las pruebas definitivas al encontrar evidencias observacionales de que la corriente cruza el plano galáctico en una posición muy cercana a la vecindad solar.

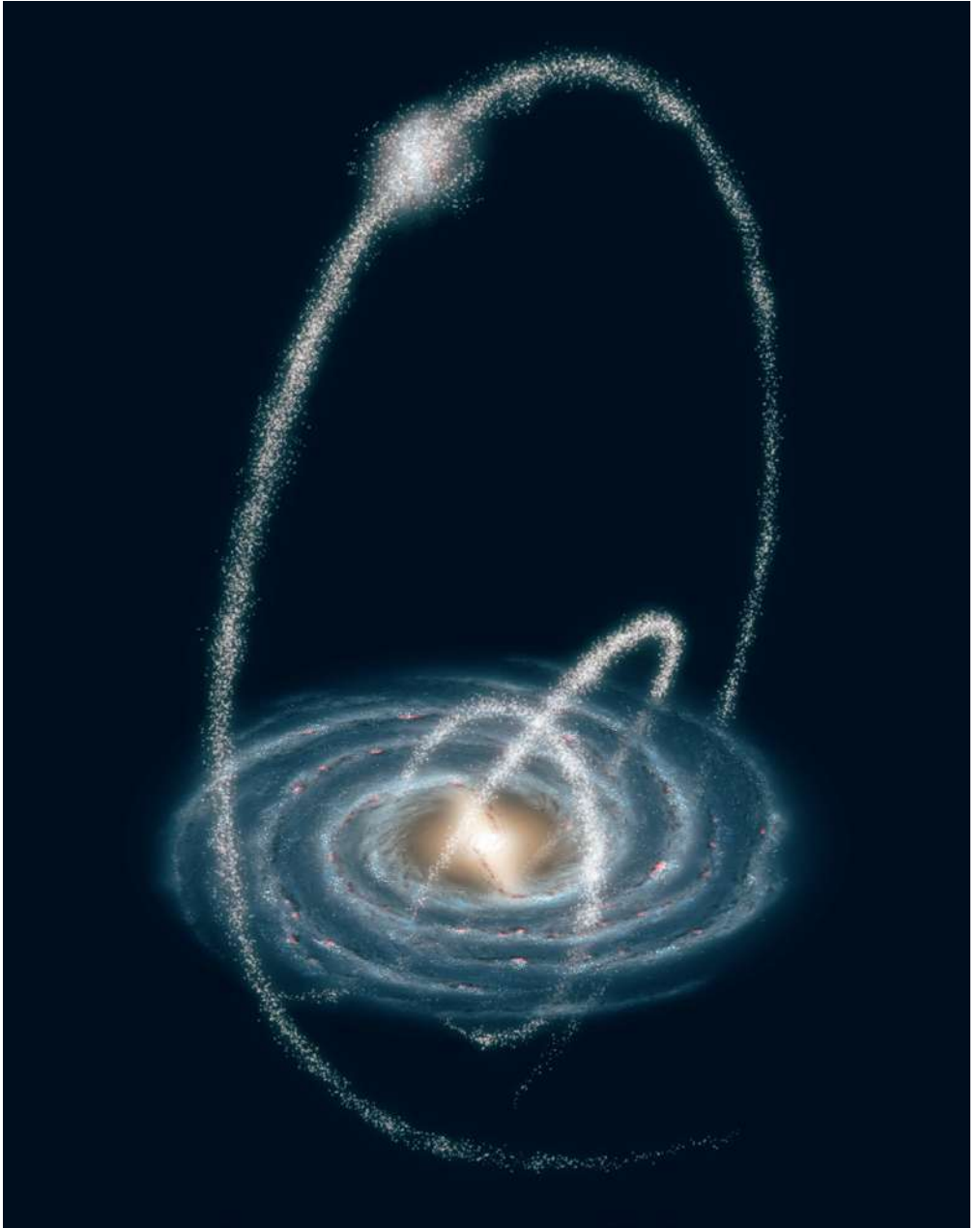


Ilustración artística de la Vía Láctea, rodeada de corrientes de estrellas que trazan la órbita de una galaxia satélite. Crédito: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech).

En el Instituto de Astrofísica de Andalucía estudiamos las poblaciones estelares de la Vía Láctea desde hace más de cuatro décadas y contribuimos, en la década de los noventa del siglo pasado, al hallazgo de lo que se conoce como Big Dent (o «gran bollo»). Hallamos que el plano galáctico no es en realidad plano, sino que su forma se asemeja a la de un cartón de huevos, con picos y valles, con un gran valle situado muy cerca del Sol, el Big Dent.

Más recientemente cabría destacar nuestra participación en Gaia (ESA), un satélite que este año completaba su misión de recoger datos de mil millones de estrellas para construir el mapa en tres dimensiones de la Vía Láctea más completo jamás construido. El proyecto Gaia-ESO, la extensión desde tierra de la misión, se diseñó para estudiar en detalle unas 100 000 estrellas y realizar un análisis exhaustivo de la formación, evolución y características de las distintas poblaciones de estrellas de la Vía Láctea.

La primera liberación de datos de Gaia-ESO (2014) permitía, precisamente, indagar en la evolución de la Vía Láctea. Analizando las proporciones de magnesio en las diferentes poblaciones de estrellas del disco galáctico, el equipo del proyecto, en el que participamos, distinguió dos ritmos de crecimiento distintos: mientras que en las regiones internas la formación de estrellas fue eficaz y rápida, en las regiones externas tomó más tiempo. Así, nos hallaríamos ante una evolución de dentro afuera, donde las regiones centrales de la galaxia se formaron antes.

Una galaxia, como veíamos unos párrafos antes, es más que estrellas, gas y polvo, y entre los ingredientes adicionales señalábamos los rayos cósmicos. Y aquí entra una de esas cosas extrañas que ocurren en el universo y que, a priori, produce bastante asombro: pedazos minúsculos de materia, que viajan casi a la velocidad de la luz, chocan todos los días con la atmósfera terrestre, se descomponen en otras partículas secundarias y estas, literalmente, nos atraviesan (aunque ni las vemos ni las sentimos).

Denominados rayos cósmicos, son en su mayoría núcleos de átomos, sobre todo de hidrógeno, pero también electrones y otras partículas subatómicas que pueden proceder del Sol, de distintas fuentes dentro de la Vía Láctea o incluso de otras galaxias. Al estar eléctricamente cargados son desviados, como virutas de metal pululando por un espacio salpicado de imanes, por los diversos campos magnéticos existentes en nuestra galaxia. Así, su recorrido varía tanto que resulta muy complicado reconstruir su trayectoria o determinar su origen.

Su origen, aceleración y propagación dentro de nuestra galaxia constituye una de las preguntas más acuciantes en física de astropartículas a día de hoy, y diversos estudios han apuntado a los púlsares para explicar estas incógnitas. Los púlsares, esos objetos que resultan de la muerte de una estrella muy masiva y que pueden rotar hasta cientos de veces por segundo, destacan también, y de ahí su nombre, porque emiten desde ambos polos un haz de luz que, al igual que un faro, atraviesa regularmente nuestra línea de visión. Estos objetos se hallan rodeados de un halo de rayos gamma, y en 2022 encabezábamos un estudio que analizaba el papel de los halos de rayos gamma en torno a los púlsares para comprender cómo se desplazan los rayos cósmicos.

Los púlsares, esos eficaces aceleradores de partículas cósmicas, parecen hallarse, también, en el origen de las ráfagas de radio rápidas (FRBs, su acrónimo en inglés), que se conocen desde 2007, pero cuyo origen era incierto. En 2020, tres estudios que se publicaron simultáneamente, uno de ellos con participación del IAA, difundían la detección de este tipo de

ráfagas y su seguimiento desde distintos observatorios, tanto terrestres como espaciales. Los resultados sugerían que se originaron en un magnetar situado en nuestra galaxia. Observaciones de la región del magnetar tomadas con la red de telescopios robóticos BOOTES (IAA) impusieron límites a la emisión óptica, lo que contribuyó a desarrollar un modelo más adecuado del entorno del magnetar y de los procesos físicos subyacentes.

En ocasiones, las ráfagas de radio rápidas van acompañadas de una emisión persistente de radio más débil, como en el caso de FRB 20201124A, una ráfaga que procede de una galaxia a unos 1300 millones de años luz de distancia y que muestra un carácter recurrente (algo poco común, ya que solo alrededor del 10 % de las aproximadamente ochocientas FRBs conocidas se repiten). En 2024 participábamos en una campaña de observación internacional que demostraba que esa radiación persistente se origina en una burbuja de plasma cuyo motor, de nuevo, remite a un magnetar (o, como opción alternativa, a un sistema binario en el que una estrella de neutrones o un agujero negro capturan gas de una estrella compañera a un ritmo intenso). Los vientos producidos serían capaces de «soplar» la burbuja de plasma, o gas ionizado, dando lugar a la emisión persistente en radio.

Estrellas, gas, polvo, rayos cósmicos, campos magnéticos, ráfagas de radio... Poco a poco, vamos conociendo mejor las piezas que componen la Vía Láctea. Pero hace no mucho hemos sabido que, para obtener una imagen completa de nuestra galaxia, hay que estudiar también lo que no se ve.

A 26 000 años luz de la Tierra, en el centro de la Vía Láctea, habita Sagitario A* (Sgr A*), un agujero negro cuya existencia no fue confirmada hasta finales del siglo pasado. Se observaron estrellas girando alrededor del centro galáctico a velocidades de 1500 kilómetros por segundo (cincuenta veces más rápido que la Tierra alrededor del Sol), lo que solo permitía una explicación: únicamente la fuerza gravitatoria de un agujero negro podría retener a estas estrellas en sus aceleradísimas órbitas. Gracias a los datos sobre las órbitas estelares (y a otros obtenidos con redes de radiotelescopios) se pudo calcular la masa de Sagitario A*, que equivale a unos cuatro millones de soles, y se confirmó que se halla contenida en un volumen muy reducido. En efecto, estábamos ante el agujero negro central de la Vía Láctea.

Se trata, como hemos sabido después, de un agujero negro en letargo que, ocasionalmente, presenta fulguraciones que evidencian su salida ocasional de la hibernación: por ejemplo, en 2008 participábamos en la detección de intensas fulguraciones producto del desgarramiento de las nubes de gas que giran, a una velocidad de vértigo, en las últimas órbitas antes de caer al agujero negro.

Los agujeros negros son, como hemos visto, objetos tan densos que su fuerza gravitatoria es tan intensa que ni la luz puede escapar, y nuestro aletargado monstruo galáctico puede mostrarnos cómo funciona la gravedad.

Einstein, en su teoría de la relatividad, mostró que el tiempo y el espacio, que siempre se habían considerado entidades diferenciadas, forman en realidad una entidad única: el espaciotiempo. La relatividad general sugiere que la geometría del espaciotiempo no es rígida, sino que la presencia de materia produce que se modifique y, más concretamente, se «curve» en las inmediaciones de los objetos. Esta curvatura es la causante de los efectos gravitatorios que rigen el movimiento de

los cuerpos (tanto el de los planetas alrededor del Sol como el de los cúmulos de galaxias), y los agujeros negros supermasivos constituyen un entorno idóneo para verificar este efecto.

En 2012 contribuíamos en el hallazgo de S0-102, la estrella más próxima a Sagitario A*, que gira alrededor del agujero negro cada 11.5 años. Hasta entonces solo se conocía una estrella, S0-2, que giraba alrededor de Sagitario A* con un periodo inferior a veinte años y que permitió establecer la masa del agujero negro. Pero con el hallazgo de S0-102 se abrieron posibilidades excitantes. En el entorno de Sagitario A*, con miles de estrellas y remanentes estelares, no podíamos medir las desviaciones en S0-2 porque la masa de esos cuerpos, indetectables con los telescopios actuales, también contribuye a las alteraciones de su órbita. Para poder desenredar los distintos efectos se necesitaban al menos dos estrellas que pudiéramos medir con alta precisión, de modo que el hallazgo de S0-102 abrió la puerta a diversos experimentos que permitirán comprobar el funcionamiento de la relatividad general.

Y en 2019 participábamos en una medida complejísima, que requirió un seguimiento de una estrella durante veintiséis años. Fue gracias a la estrella S2, que dibuja una elipse muy pronunciada en torno a Sagitario A* y que, en el punto de máximo acercamiento, se sitúa a tan solo unas tres veces la distancia que existe entre el Sol y Plutón. A esa distancia, y debido a la enorme fuerza de gravedad del agujero negro, la relatividad predice que los fotones (o partículas de luz) deberían sufrir una pérdida de energía, lo que se conoce como desplazamiento al rojo gravitatorio. Y es, precisamente, lo que midió el equipo científico.

Enfocando, de nuevo, en Sagitario A*, llegamos a una noticia que hace unas décadas parecía imposible. En 2022, el Instituto de Astrofísica de Andalucía colideraba a nivel internacional los trabajos para la obtención de la primera imagen de Sgr A*, que proporcionaba la primera evidencia visual directa de que se trata de un agujero negro supermasivo.

El hallazgo fue posible gracias al Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT, por sus siglas en inglés), el mismo que aportó la primera imagen de un agujero negro, en este caso de la galaxia M87. Aunque no podemos ver el agujero negro en sí, ya que se trata de un objeto totalmente oscuro, el gas brillante que lo rodea muestra una firma reveladora: una región central oscura, llamada «sombra», rodeada por una estructura brillante en forma de anillo.

A pesar de la cercanía de Sgr A*, fue un resultado considerablemente más difícil que el de M87, una galaxia situada a cincuenta y cinco millones de años luz. El gas en las proximidades de ambos objetos se mueve a la misma velocidad, casi tan rápido como la luz, pero mientras que el gas tarda entre días y semanas en orbitar alrededor de M87*, en Sgr A*, mucho más pequeño, completa una órbita en cuestión de minutos. Así, el brillo y el patrón del gas alrededor de Sgr A* cambiaban rápidamente mientras se observaba, y el equipo tuvo que desarrollar sofisticadas herramientas que dieran cuenta del movimiento del gas.

Dos años después, la colaboración del EHT presentaba la primera imagen en luz polarizada de Sgr A*, que revelaba la presencia de intensos y organizados campos magnéticos que emergen dibujando una espiral desde el borde mismo del agujero negro. Una estructura similar a la observada en M87, lo que sugiere que estos intensos campos magnéticos pueden ser comunes a todos los agujeros negros y que apunta a la posible existencia de un chorro oculto en Sgr A*, como el existente en M87.



Región de Sagitario B1, situada en las áreas centrales de la Vía Láctea.
Crédito: GALACTICNUCLEUS.

El entorno de Sgr A* constituye un impresionante laboratorio astrofísico, que nos permite estudiar la influencia de los agujeros negros centrales de las galaxias, pero, también, los entornos de formación rápida de estrellas. Sin embargo, la alta densidad de estrellas en esta región ha impedido, históricamente, su estudio en detalle. El proyecto GALACTICNUCLEUS, desarrollado en el IAA y cuyo catálogo se publicó en 2021, permitía, por fin, obtener un censo representativo: donde antes solo se habían estudiado un puñado de estrellas, obtuvimos datos individuales para tres millones.

Este censo nos permitió bucear en estas regiones extrañas de la galaxia, próximas al núcleo, que muestran características similares a lo que conocemos como galaxias *starburst* (galaxias con brotes estelares), que dan lugar a decenas o incluso cientos de masas solares de estrellas por año. Características similares, también, a lo que debió ser la norma en los primeros miles de millones de años de la historia del universo, y muy distintas al conjunto de la Vía Láctea, cuyo ritmo de formación estelar no supera unas pocas masas solares por año.

El proyecto GALACTICNUCLEUS nos permitía, en 2019, relatar la historia completa de la formación estelar del centro galáctico donde, en efecto, se documentaron eventos típicos de galaxias hiperproductivas. Vimos que alrededor del 80 % de las estrellas en el centro de la Vía Láctea se formaron en el pasado remoto, hace entre ocho y 13 000 millones de años. Este periodo de formación inicial de estrellas fue seguido por unos 6000 millones de años de latencia durante los que apenas nacieron estrellas. Y el periodo estéril llegó a su fin con un intenso estallido de formación estelar hace alrededor de mil millones de años: estrellas con una masa combinada de varias decenas de millones de soles se formaron en el centro galáctico en un periodo inferior a cien millones de años. Un estallido de formación estelar tan intenso que originó más de cien mil explosiones de supernova.

LOS NÚCLEOS DE LAS GALAXIAS

Antes de dar el siguiente salto, que nos lleva de la Vía Láctea a los cúmulos y supercúmulos de galaxias, vamos a aprovechar el tirón gravitatorio de Sagitario A* para ver cómo se comportan sus semejantes. Se estima que, a lo largo de su vida, Sgr A* ha absorbido una cantidad de materia equivalente a más de dos millones de soles. Pero, como hemos visto, se considera un agujero negro en letargo, lo que nos introduce en un tipo de objetos que cambiaron el modo de entender las galaxias, los núcleos activos de galaxias (AGNs, del inglés). Hablamos de galaxias cuya energía, muy superior a la que pueden producir sus estrellas, se halla concentrada en la región central o núcleo.

Nuestra comprensión de los AGNs constituye un hermoso ejemplo de cómo avanza el conocimiento científico. A lo largo del siglo pasado se fueron acumulando descubrimientos de galaxias «peculiares»: en los años cuarenta se hallaron las galaxias Seyfert, con un núcleo muy compacto y brillante e indicios de gas moviéndose a altísimas velocidades; a partir de los años cincuenta comenzaron a estudiarse las radiogalaxias, un tipo de galaxias que en el visible parecen normales, pero que en radio muestran una emisión muy intensa a ambos lados del núcleo; en 1960 se halló el primer cuásar, un objeto que se veía como una débil estrella azul, pero que resultó ser una monstruosa fuente de energía situada a 2500 millones de años luz de distancia; y a finales de los años setenta se descubrió que unos objetos clasificados como estrellas variables eran en realidad galaxias activas muy luminosas y distantes, los BL Lacertae.

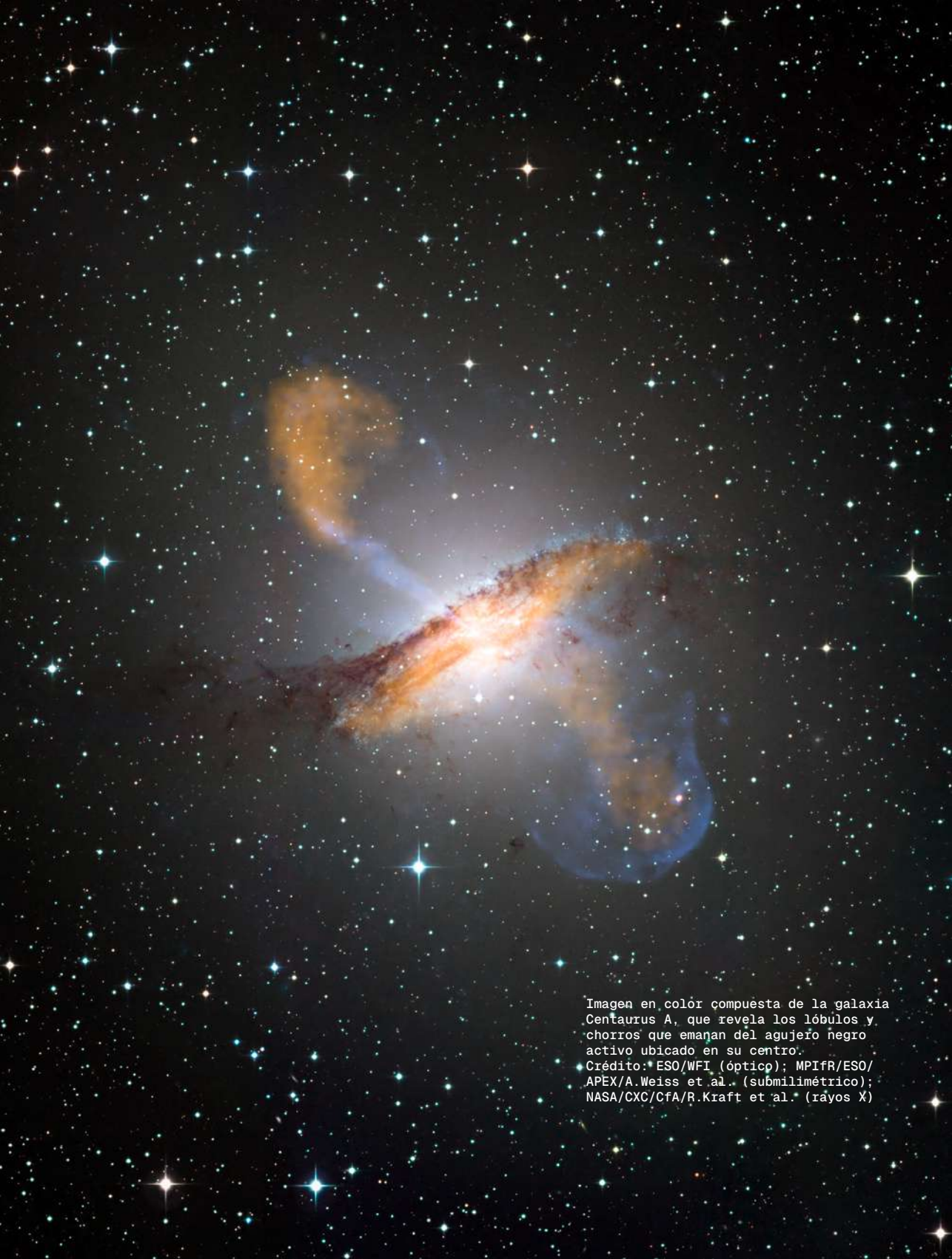


Imagen en color compuesta de la galaxia Centaurus A, que revela los lóbulos y chorros que emanan del agujero negro activo ubicado en su centro.
Crédito: ESO/WFI (óptico); MPIfR/ESO/APEX/A.Weiss et al. (submilimétrico); NASA/CXC/CfA/R.Kraft et al. (rayos X)

Décadas de investigación llevaron a un modelo que agrupaba todos estos objetos, y que involucra la existencia de un agujero negro de cientos o miles de millones de soles. Es la materia existente en el entorno del agujero negro la que, en su proceso de caída, libera grandes cantidades de energía, y más allá encontramos nubes de gas a gran velocidad y una estructura de gas y polvo con forma de toroide (o rosquilla) que rodea el objeto. En algunos casos, en torno a un 10 % de los AGNs, se observan también dos chorros de partículas que viajan casi a la velocidad de la luz que emanan del núcleo, en dirección más o menos perpendicular al plano del toroide.

A principios de este siglo se constató que todas las galaxias con masas parecidas a la de la Vía Láctea o mayores albergan un agujero negro supermasivo en su centro. Además, aunque estamos hablando de regiones con tamaños completamente diferentes, la masa de este agujero negro descomunal está relacionada con la masa central de la galaxia que lo alberga, lo que apunta a una conexión entre el proceso de formación de la galaxia y del agujero negro y que, además, parece tener mucho que ver con la evolución del universo, ya que la época más activa de formación estelar se corresponde con el máximo en actividad nuclear en el cosmos.

Ahora, ¿por qué observamos un tipo u otro de galaxia activa? En buena medida, se debe a la orientación: dependiendo de su posición con respecto a nosotros, el toroide mostrará o velará la parte central de la galaxia, donde se produce la energía, y los chorros aparecerán amplificados o debilitados si apuntan o no hacia nosotros. Se trata de un esquema que, en general, funciona muy bien, pero al que hay que añadir otros factores en cada caso concreto, como las características concretas del toroide, la masa del agujero negro o su capacidad de acumular materia, y que determinarán si un núcleo activo es más o menos poderoso. Este modelo unificado, que ordenaba las distintas galaxias peculiares y proponía un mecanismo común, aún no responde a ciertas preguntas. Por ejemplo, si debemos determinar qué ha de ocurrir para que una galaxia sea activa (o no, como el caso de la Vía Láctea y muchas otras).

En el IAA nos ocupamos de núcleos activos en todo el rango, desde los más potentes, los cuásares, hasta los que muestran baja luminosidad. En cuanto a los primeros, hemos hallado que, además de los cuásares lejanos, muy energéticos, de rápida evolución y asociados a grandes fusiones de galaxias, existe una población de cuásares que evoluciona a un ritmo mucho más pausado: una población tranquila que, debido a las limitaciones tecnológicas, aún no hemos sido capaces de investigar. En cuanto a los núcleos activos menos potentes, que constituyen la mayoría, nuestro estudio multifrecuencia nos permitió analizar la posibilidad de que el esquema utilizado de modo general para los núcleos activos más potentes (con el agujero negro supermasivo, el disco de acrecimiento y el toroide) necesite modificarse al desaparecer el toroide a estas bajas luminosidades.

También, en todo el rango de galaxias activas, investigamos las condiciones necesarias para encender la actividad en los núcleos galácticos (o los factores que provocan que un agujero negro supermasivo salga de su letargo), así como el papel que juegan la actividad nuclear y el entorno en la evolución de las galaxias.

Incluso hemos alcanzado récords en resolución: en 2016 liderábamos una colaboración internacional que batía todas las marcas gracias al uso combinado de quince antenas terrestres y

la antena de la misión espacial RadioAstron (Agencia Espacial Rusa), en órbita alrededor de la Tierra. El trabajo, que aportó la imagen con mayor resolución de la historia de la astronomía, mostraba las entrañas del núcleo galáctico conocido como BL Lacertae (que dio nombre a la categoría de objetos que comentábamos párrafos atrás). Y halló en su chorro una concentración de energía muy por encima de lo observado hasta entonces en los AGNs, que levantaba dudas sobre los modelos teóricos empleados para explicar cómo brillan estos objetos.

Sabemos que los procesos de fusión de galaxias pueden alimentar al agujero negro, así como generar brotes muy intensos de formación de estrellas. También conocemos que los procesos generados por el propio agujero negro pueden afectar a su galaxia, hasta el punto de inhibir o incrementar la formación de estrellas, lo que está estrechamente relacionado con sus tasas de acreción y con la presencia de dos componentes esenciales: los supervientos galácticos y los chorros nucleares.

Los supervientos galácticos, capaces de generar grandes cantidades de energía y de transportar gas a inmensas distancias, juegan un papel fundamental en este escenario, y hemos podido comprobar sus notables efectos en los AGNs muy energéticos. Sin embargo, se trataba de una característica no explorada en las llamadas LINERs, galaxias activas de baja potencia que constituyen las más abundantes del universo local. El Instituto de Astrofísica de Andalucía desarrollaba en 2022 el atlas más completo de supervientos en este tipo de galaxias y mostraba que, aproximadamente, un 50 % de todas las LINERs en el universo local muestran supervientos galácticos. Así, estos mecanismos son comunes incluso en las galaxias más alejadas y tranquilas.

Los supervientos contribuyen a que el material se distribuya en los núcleos galácticos, pero la imagen completa suele ser más compleja. Para que un agujero negro esté activo debe existir material para alimentarlo y un mecanismo eficiente para transportar el material hacia el núcleo. Entre esos mecanismos destacan tres: los discos, estructuras aplanadas que giran en torno al agujero negro y cuyo material cae en espiral hacia el centro; las barras, estructuras alargadas que se extienden a ambos lados del núcleo y que canalizan el gas desde los brazos de las galaxias espirales hacia el núcleo; o los vientos, esos flujos muy veloces de gas y polvo capaces de desplazar grandes masas de material.

Pero no siempre intervienen todos, como pudimos comprobar en un trabajo que encabezamos en 2020. Nos adentrábamos en el corazón de NGC 7569, una galaxia Seyfert —un tipo de galaxia activa que muestra un núcleo muy brillante— que muestra una alta tasa de formación de estrellas atribuida a una interacción pasada con su galaxia compañera. En NGC 7469 hallamos tres componentes: dos correspondientes a discos que rotan acompasadamente en el mismo plano, y otra que no muestra rotación y que el equipo científico asociaba a la presencia de vientos.

Además de gas, en ocasiones los agujeros negros supermasivos devoran, directamente, estrellas. Esa es la explicación que proponía un equipo científico en el que participaba el IAA para dar cuenta de la extraña luminosidad del estallido Sw 1644+57, detectado en 2011. Aunque al principio se creyó que se trataba de un GRB, este evento no solo mantuvo su luminosidad, sino que se reactivó otras tres veces en dos días y mostró una intensidad nunca vista en todas

las longitudes de onda. Tras un primer análisis quedó claro que no se trataba de un GRB, y que su explicación requería de algún nuevo tipo de fuente desconocida hasta la fecha: quizá la ruptura y caída hacia el agujero negro de parte del gas de una estrella próxima.

Según los modelos teóricos, en los eventos de disrupción por mareas, en los que un agujero negro destruye una estrella, la mitad de la masa de la estrella es expulsada al espacio y la otra mitad es absorbida por el agujero negro. La súbita inyección de material produce un brillante destello (visible en rayos gamma, rayos X y óptico), seguido de emisiones transitorias en radio y de la formación de un chorro de material que se mueve a velocidades muy cercanas a la de la luz.

Y eso es, precisamente, lo que un estudio que coordinamos en 2018 halló en el núcleo de la galaxia en proceso de fusión Arp 299-B. Diez años de observaciones permitieron presenciar cómo la región luminosa se alargaba y expandía, tal como se esperaría para un chorro, a una velocidad equivalente a un cuarto de la velocidad de la luz. Así pudieron descartarse otros posibles escenarios para el fenómeno y afirmar el más probable. El agujero negro supermasivo de Arp 299-B, con unos veinte millones de masas solares, había desgarrado una estrella de entre dos y seis veces la masa del Sol.

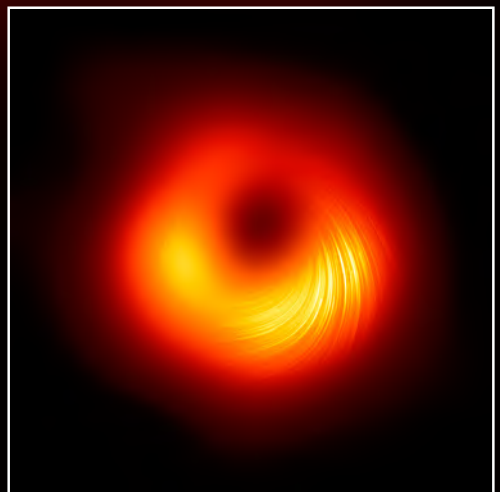
En 2022, cazamos de nuevo un agujero negro devorando una estrella. El descubrimiento remite a un intenso destello, conocido como AT2022cmc, que reveló la existencia de un chorro de materia cuya orientación quizá explique su intensidad: muy posiblemente el chorro apuntaba hacia la Tierra. El análisis de este fenómeno ponía en relieve nuestro desconocimiento de por qué algunos eventos de disrupción por mareas producen chorros y otros no. Y sugería que, probablemente, la diferencia radique en cómo rota el agujero negro supermasivo, y que una velocidad de rotación alta sea un ingrediente necesario para el lanzamiento de los chorros.

Un paso de gigante en nuestra comprensión de los agujeros negros supermasivos fue la obtención, en 2019, de la primera imagen de uno de ellos, el del centro de la galaxia Messier 87 (M87), 6500 millones de veces más masivo que el Sol. Fue posible gracias al Telescopio Horizonte de Sucesos (EHT), un telescopio de escala planetaria, y revelaba la estructura en forma de anillo con una región oscura central, la sombra del agujero negro, que hemos visto en Sagitario A*. El IAA desarrolló uno de los tres algoritmos usados para la reconstrucción de las imágenes, y coordinó uno de los artículos donde se presentaban.

En 2021, el EHT mostraba el agujero negro de M87 en luz polarizada, una evidencia única para comprender cómo se comportan los campos magnéticos alrededor de los agujeros negros. Todavía no sabemos exactamente cómo se impulsan chorros más extensos que la propia galaxia desde su región central, tan pequeña en tamaño como el Sistema Solar, ni cómo cae la materia en el agujero negro. Las observaciones sugieren que los campos magnéticos en el borde del agujero negro son lo suficientemente intensos como para retener el gas caliente y ayudarlo a resistir la atracción de la gravedad. Así, solo el gas que se desliza a través del campo puede girar en espiral hacia el horizonte de sucesos.

Pero nuestro conocimiento de este célebre agujero negro va más allá. En 2023 se fotografiaba por primera vez una panorámica inédita, que mostraba simultáneamente el agujero negro y el chorro de materia que emerge de él, y que revelaba algo sobre su naturaleza: no tiene mucha

El agujero negro supermasivo
de la galaxia M87, la primera
imagen de un agujero negro nunca
obtenida. En pequeño observamos
el agujero negro en luz
polarizada.
Crédito: Colaboración EHT.



hambre. Consume materia a un ritmo bajo, convirtiendo solo una pequeña fracción en radiación. Y, ese mismo año, participábamos en un trabajo que, tras analizar observaciones durante veintitrés años, mostraba que el chorro que emerge del agujero negro a altísima velocidad oscila hacia arriba y hacia abajo con una amplitud de unos diez grados, lo que a su vez confirma que el agujero negro se halla en rotación. La rotación de los agujeros negros supermasivos, un factor crucial en las teorías que explican el nacimiento de los chorros, nunca se había observado directamente.

Los chorros de partículas, el otro mecanismo que, junto con los supervientos, redistribuye el material en el entorno del agujero negro, requieren de la concurrencia de tres elementos: un agujero negro, un disco de material que gira a su alrededor y campo magnético. Si bien el escenario que los explica se halla, en general, más o menos asentado, es en las distancias cortas donde nos falta detalle. Y en este punto varios trabajos desarrollados desde el IAA han iluminado regiones antes oscuras.

Durante cerca de año y medio, entre 1997 y 1999, un equipo liderado por el IAA tomó imágenes mensuales del chorro en la radiogalaxia 3C120, lo que permitió detectar regiones que presentaban cambios rápidos de brillo, acompañados de variaciones bruscas en la estructura e intensidad del campo magnético. Estas inusuales variaciones se interpretaron como consecuencia de la interacción del chorro con una nube de gas ionizado, similar a otras dos halladas con anterioridad.

Los chorros, como vemos, no son emisiones constantes y estables, sino que se modulan con el tiempo. De hecho, en 2010 coordinábamos un estudio que mostraba este punto con claridad. Localizábamos la región donde surgió un destello en rayos gamma en el blázar AO 0235+164, un tipo de galaxia activa muy brillante cuyos chorros vemos casi de frente; y hallamos que, en lugar de producirse en una región del chorro muy cercana al agujero negro, el pico de emisión se situaba a unos cuarenta años luz de él.

Esto impulsó el desarrollo de un nuevo mecanismo que manejaba la existencia de dos «piezas», una estática (el chorro) y otra en movimiento (correspondiente a la nueva inyección de material), y de una región del chorro que confina el material, acelera las partículas y produce un aumento de la energía emitida. Cuando la nueva componente atraviesa esa región, comienzan a producirse los destellos observados.

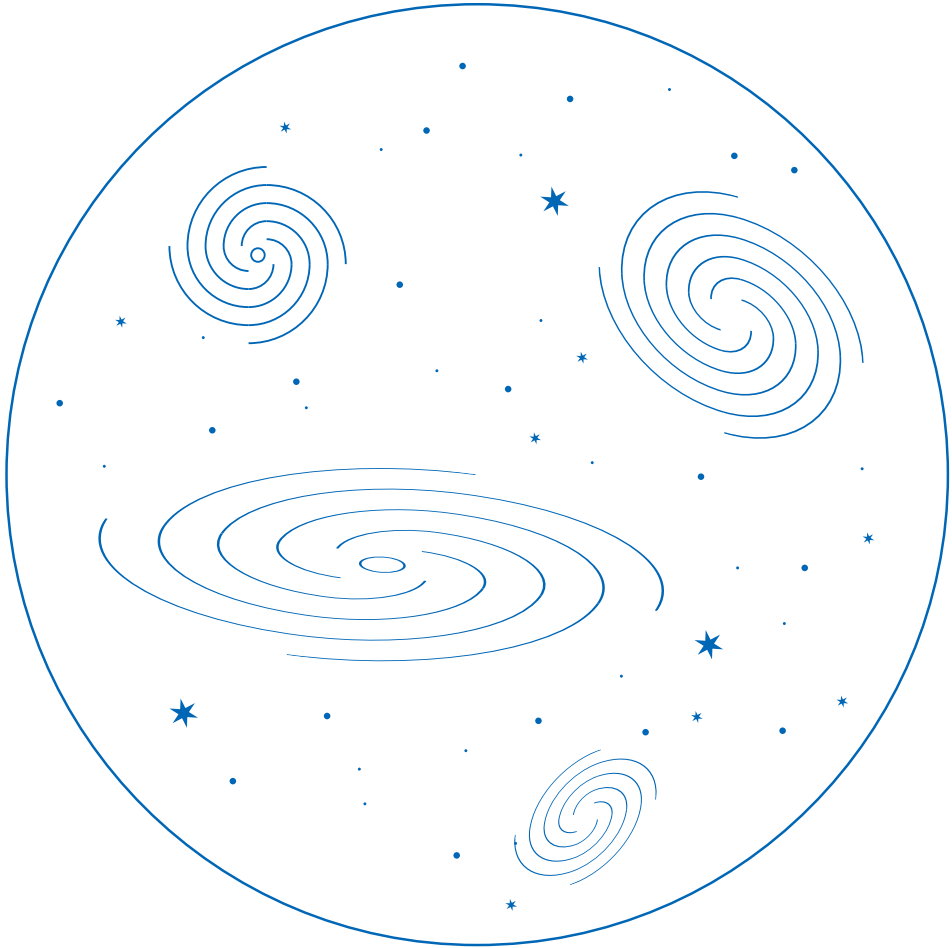
Y, en 2022, colaborábamos en un estudio que respondía a una pregunta irresoluble durante décadas: ¿cómo se aceleran las partículas de estos chorros hasta energías tan altas? El trabajo, que observó el blázar Markarian 501, mostró que el escenario más viable implicaba la existencia de una onda de choque que acelera las partículas del chorro (una onda de choque se genera cuando una onda de presión se mueve más rápido que la velocidad del sonido del material circundante, como cuando un avión supersónico atraviesa la atmósfera terrestre).

Incluso hemos hallado componentes nuevas en los chorros. En 2023 dirigíamos una campaña de observación con una resolución sin precedentes del chorro del blázar 3C 279, y hallábamos una compleja estructura compuesta por al menos dos filamentos helicoidales que se extienden desde cerca del núcleo hasta más de 570 años luz de distancia. La explicación de estos filamentos, originados por inestabilidades en el plasma que componen los chorros, requirió que desarrolláramos un modelo alternativo al empleado desde hace cuatro décadas.

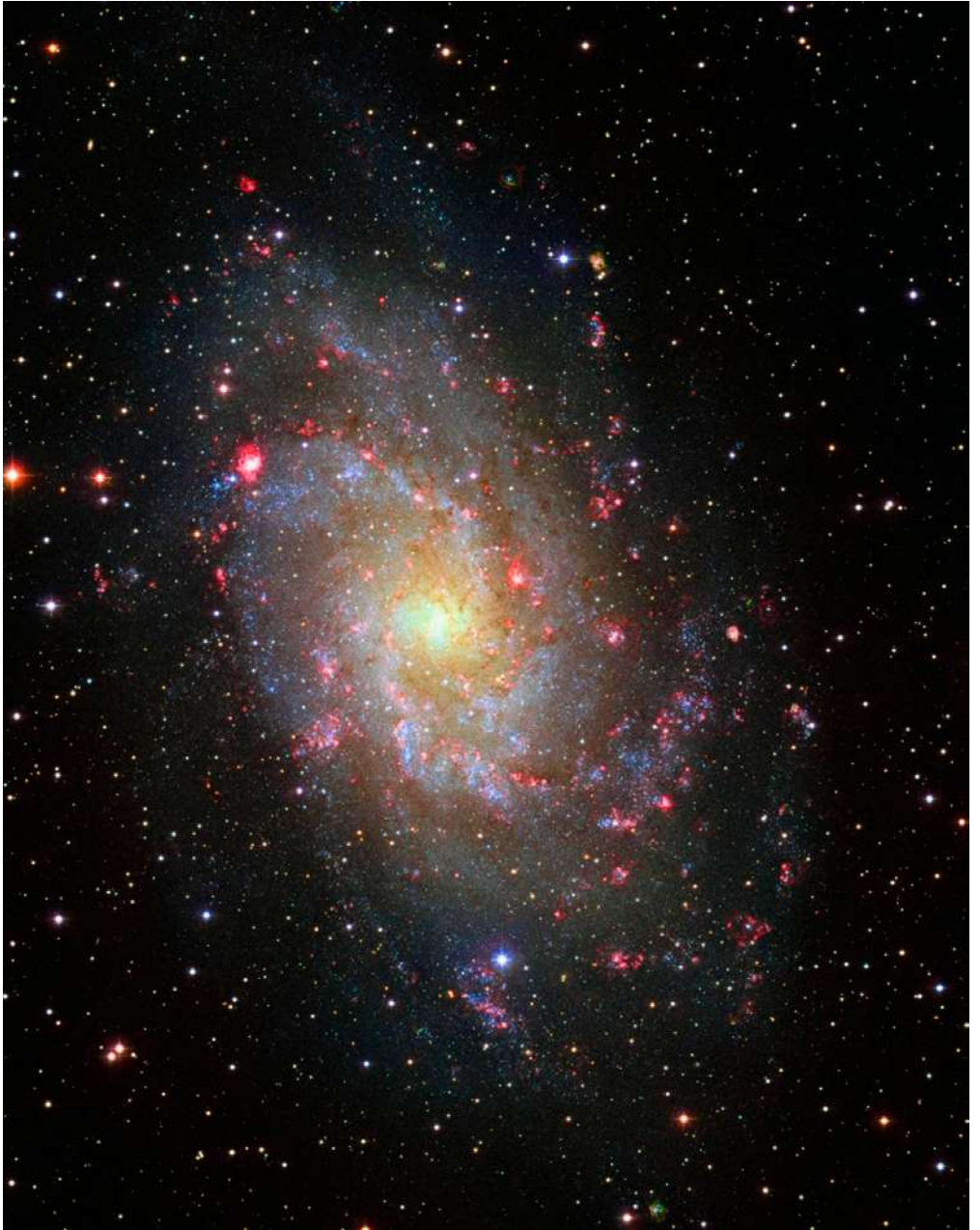
Y nos despedimos, de camino a las galaxias de los núcleos activos con objetos poco comunes: agujeros negros supermasivos binarios. En 2022 un equipo científico internacional encabezado por el IAA obtenía la imagen con mayor resolución de las regiones centrales del blázar OJ 287 que apuntaba a que nos hallábamos ante un dúo único de baile, con el agujero negro secundario orbitando al primario y perforando su disco de acreción dos veces cada doce años. Y en 2024 participábamos en el estudio de un intrigante evento transitorio, AT 2021hdr, que concluyó que este evento responde a la interacción entre un sistema binario de agujeros negros supermasivos y una nube de gas: debido a las intensas fuerzas de marea generadas por los agujeros negros, la nube comenzó a disolverse, el gas se calentó y, mientras una parte de él era absorbida, la otra era expulsada en cada órbita.

F.

**INFINIDAD
DE GALAXIAS**



Aunque resulte un poco difícil recuperar el aliento después de imaginar parejas de agujeros negros supermasivos en danza, aún nos falta la perspectiva amplia, la universal. Porque, al igual que con las estrellas, que requieren estudios individualizados y de grupo, las galaxias también se abordan desde esa doble perspectiva: mientras que el estudio en detalle aporta datos que completan los modelos, el análisis de muestras amplias de galaxias nos permite conocer su evolución o desentrañar la historia del universo.



La galaxia del Triángulo, o M33, perteneciente al Grupo Local.
Crédito: Giuseppe Donatiello.

GRUPO LOCAL

Nuestra galaxia forma, junto con otras treinta y tres más, el llamado Grupo Local, que se extiende a lo largo de unos diez millones de años luz. La mayor de las galaxias del grupo es Andrómeda, con un tamaño que dobla el de la Vía Láctea, seguida de esta y de M33. El resto son pequeñas galaxias esferoidales e irregulares, como las Nubes de Magallanes, dos galaxias satélite de la nuestra observables a simple vista desde el hemisferio sur.

Sabemos que las grandes galaxias crecen absorbiendo galaxias menores, y que los vestigios de esas fusiones pueden hallarse a las afueras de las galaxias, en forma de colas o regueros de estrellas. Esto hallaba, precisamente, un grupo científico encabezado por el IAA en 2015 en la otra gigante del grupo, Andrómeda (o M31), que constituye un excelente laboratorio para estudiar las características e historia de las grandes galaxias espirales: estudiamos una muestra de nebulosas planetarias situadas en las dos subestructuras principales de Andrómeda y hallamos que estas estructuras podrían deberse a la interacción de Andrómeda con M32, una de sus galaxias satélite.

Por su parte, la galaxia M33, la tercera mayor del Grupo Local (conocida también como galaxia del Triángulo), supone un problema. Los datos apuntan a que se halla ligada gravitatoriamente a Andrómeda, y representa un claro exponente de lo que se conoce como el problema de los satélites perdidos: según las simulaciones a partir del modelo cosmológico que mejor explica el origen y la evolución del universo (Lambda-CDM, acrónimo en inglés de Lambda-materia oscura fría), debería contar con entre nueve y veinticinco galaxias satélite, pero hasta la fecha solo se ha hallado una.

Esta discrepancia se ha relacionado con una posible interacción en el pasado con Andrómeda, que pudo expulsar sus satélites, pero los movimientos orbitales indican que M33 se halla en su primera caída hacia ella. Nuestro hallazgo, en 2021, de la galaxia Píscis VII, que en 2024 se confirmaba como satélite de M33, pone de manifiesto que el problema de los satélites perdidos pueda deberse a la carencia de datos muy profundos, y que el uso de telescopios de ocho o diez metros permitirá hallar más satélites aún sin descubrir.

Pero las interacciones en el Grupo Local no terminan ahí. También se ha detectado la interacción de la Vía Láctea con las Nubes de Magallanes y con la galaxia de Andrómeda, esto último de tremendas consecuencias: la Vía Láctea y Andrómeda están acortando su distancia de 2.5 millones de años luz a una velocidad de 500 000 kilómetros por hora. La velocidad aumentará conforme se vayan acercando y, en unos 3000 millones de años, se producirá un choque que dará lugar a una galaxia supergigante.

Nuestro agitado vecindario constituye, no obstante, una diminuta entidad dentro del universo, formado por miles de millones de galaxias que se agrupan, debido a su fuerza de gravedad, en pares de galaxias, grupos de decenas de ellas, cúmulos de cientos y supercúmulos.

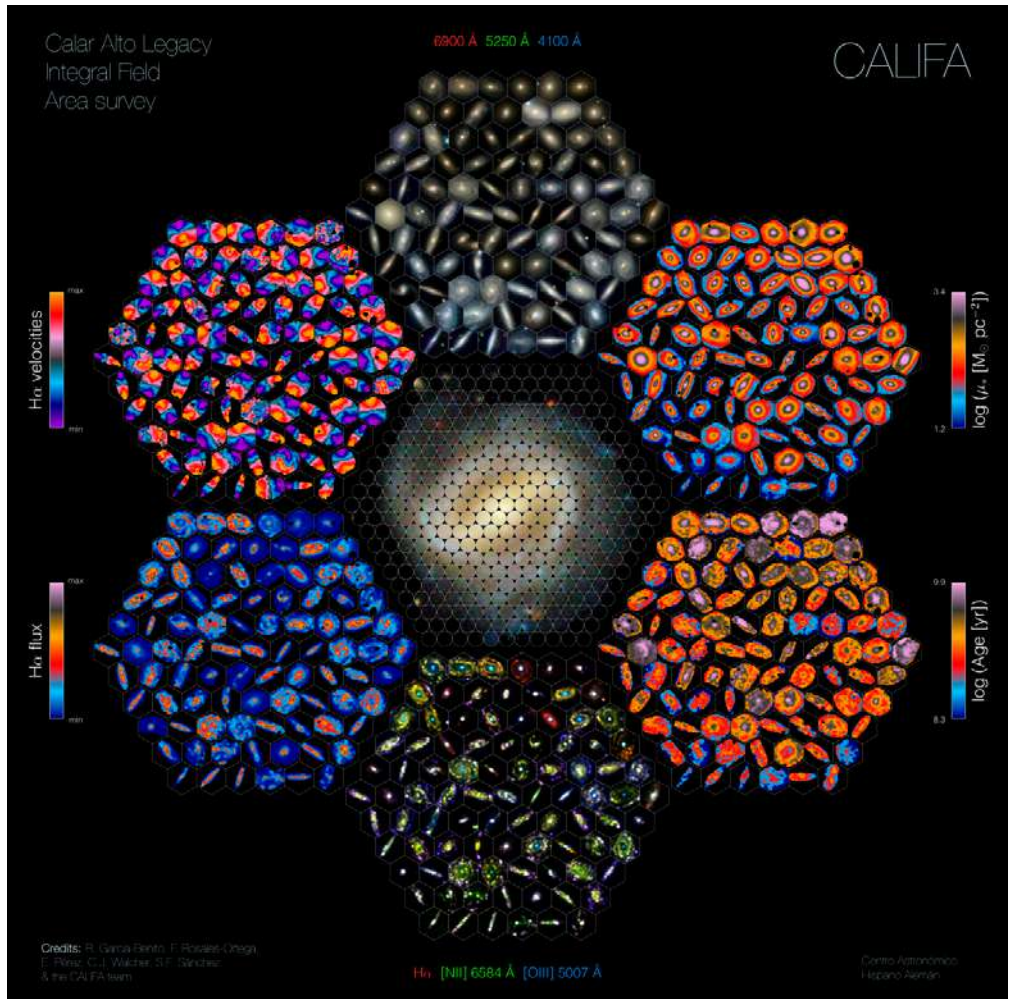
GRANDES MUESTREOS DE GALAXIAS

Sabemos que las galaxias crecen convirtiendo el gas en sucesivas generaciones de estrellas, y también que las más grandes alcanzaron su tamaño mediante la fusión de otras menores. Pero ¿cómo averiguar, a partir de la imagen de una galaxia, cómo se formó o cómo ha evolucionado a lo largo de miles de millones de años? Más aún: ¿cómo desentrañar la historia de las galaxias y comprender su diversidad?

Para responder a estas cuestiones, en lugar de estudiar objetos individuales se emplean muestreos, que analizan una muestra representativa de toda una población, y en el Instituto de Astrofísica de Andalucía se han gestado dos grandes cartografiados de galaxias, ambos desarrollados desde el Observatorio de Calar Alto: ALHAMBRA y CALIFA.

Tras siete años de precisas observaciones, y gracias a una técnica que descompone la energía de las estrellas en sus colores mediante filtros astronómicos, ALHAMBRA fue capaz no solo de identificar y clasificar más de medio millón de galaxias, sino también de calcular las distancias a las que se encuentran de nosotros con una asombrosa precisión. Como resultado, permitió reconstruir la visión tridimensional más realista del universo.

Antes de ALHAMBRA, disponíamos de sondeos de gran área y poca profundidad o de muestras muy profundas del cielo que contemplaban una única y reducida región, lo que no tenía en cuenta lo que se conoce como varianza cósmica, derivada del hecho de que el universo presenta regiones más y menos densas de galaxias. La gran fortaleza de ALHAMBRA residía en el estudio en detalle de ocho regiones profundas del cielo, lo que



El mandala del proyecto CALIFA, que muestra imágenes en banda ancha, densidad de masa estelar, edad media de las estrellas, líneas de emisión de diagnóstico, emisión en hidrógeno alfa y cinemática.

aportó una muestra representativa y aseguraba que cualquier conclusión que se extrajera de ella podía aplicarse a todo el universo.

La visión del universo que aportó ALHAMBRA permitía, por una parte, estudiar cómo ha cambiado el contenido estelar de las galaxias a lo largo del tiempo, es decir, saber cómo, cuándo y cuánto han envejecido, y también establecer una relación inequívoca entre la morfología, el contenido en estrellas y la edad de las galaxias. ALHAMBRA permitió también abordar cómo se distribuyen las galaxias en el universo e incluso estudiar la nuestra, la Vía Láctea.

El sondeo CALIFA, por su parte, aportaba una visión sin precedentes de seiscientas galaxias del universo local. El proyecto se diseñó, de nuevo, para responder a las limitaciones de los sondeos del momento, que empleaban bien la fotometría, que aporta gran resolución espacial, pero información poco detallada sobre las características físicas de las galaxias, o la espectroscopía, que permite conocer las propiedades de las galaxias, pero sin acotar esos rasgos a regiones específicas.

CALIFA conjugaba ambas: obtenía más de mil espectros por cada una de las seiscientas galaxias de la muestra y permitió generar mapas con distintas propiedades de las galaxias como la velocidad, la edad de sus estrellas o el movimiento del gas. Así, gracias a CALIFA obteníamos tres perspectivas galácticas. Por un lado, permitió conocer las galaxias con un nivel de detalle hasta entonces inconcebible. Además, aportó datos sobre la evolución de cada galaxia en el tiempo, que indica cuándo y cuánto gas se convirtió en estrellas en cada etapa, y que también revelaba la evolución de la galaxia en cada una de sus regiones a lo largo de 10 000 millones de años. Finalmente, nos permitió extraer la historia de la evolución en masa, brillo y elementos químicos de todas ellas.

Gracias a CALIFA pudimos comprobar que las galaxias más masivas crecen más rápido que las menores, y que además lo hacen de dentro afuera, formando las regiones centrales en primer lugar. También se han obtenido resultados sobre cómo se producen, dentro de las galaxias, los elementos químicos necesarios para la vida, o sobre los fenómenos involucrados en las colisiones galácticas. Incluso hemos sido capaces de observar directamente la última generación de estrellas que se ha formado en el universo, y que aún se halla dentro de sus nidos de formación.

ALHAMBRA y CALIFA siguen aportando resultados, a los que se unirán los que nos ofrezca J-PAS, un proyecto coliderado por el IAA y diseñado para cartografiar una gran porción del cielo y estudiar en detalle la evolución de las galaxias y la naturaleza del universo en expansión. J-PAS, que observará miles de grados cuadrados del cielo con cientos de millones de galaxias y estrellas, será el cartografiado fotométrico más completo del universo. Solo la primera liberación de datos, publicados en abierto en 2024 y disponibles para toda la comunidad científica, revelan la posición tridimensional de cien mil estrellas y unas 450 000 galaxias, lo que da cuenta de su potencial.

EL PASADO DEL UNIVERSO

Tenemos una idea de cómo eran las galaxias en épocas pasadas, y, de hecho, en el IAA hemos participado en hallazgos récord en galaxias lejanas (y, por lo tanto, muy jóvenes), pero resulta técnicamente imposible estudiarlas en detalle debido a la distancia. Para solventar este problema estudiamos análogos, u objetos similares en entornos más próximos, y participamos en desarrollos tecnológicos que mejoren nuestra capacidad de observación, como MEGARA, un instrumento para el Gran Telescopio Canarias gracias a MEGARA podemos estudiar el gas situado entre las galaxias distantes, captar la luz de estrellas individuales en otras galaxias o analizar cómo se movían las estrellas y el gas en las galaxias hace más de 10 000 millones de años.

Existe un enorme abismo entre la composición química del universo primigenio, prácticamente formado por hidrógeno (93 %) y helio (7 %), los elementos primordiales que surgieron tras el Big Bang, y la composición actual, con proporciones variables de una larga lista de elementos (carbono, oxígeno, hierro, nitrógeno...). Sabemos que fueron las estrellas las que, a través de las reacciones nucleares, operaron el cambio y aumentaron la proporción de metales (en astrofísica, se conoce así a los elementos más pesados que el hidrógeno y el helio), y, por lo tanto, el estudio de la evolución química de las galaxias resulta esencial para la comprensión de la historia del universo.

Esta evolución se estudia a través de lo que se conoce como «relación masa metalicidad», que analiza la proporción de elementos pesados que contiene una galaxia con respecto a la masa total de estrellas que presenta. Dicha relación está bien establecida en el universo local, donde las galaxias enanas son menos metálicas que las masivas, pero existía un debate sobre

si esa relación se había mantenido igual o no a lo largo de todas las etapas cosmológicas. Un estudio, encabezado por el IAA, midió en 2012 la metalicidad a lo largo de los últimos 10 000 millones de años y despejó las dudas al respecto: las galaxias más distantes —y, por lo tanto, más jóvenes— tienen menor proporción de elementos pesados que las del universo local, confirmando así el modelo que afirma que las grandes galaxias se formaron a partir de la fusión de otras más pequeñas.



IZw18, una de las galaxias más pobres en metales conocidas.

Crédito: NASA, ESA, and Y. Izotov (MAO, Kyiv, UA) and T. Thuan (U. Virginia).

Sin embargo, las primerísimas galaxias escapan aún de nuestra capacidad de observación. Formadas hace unos 13 300 millones de años y compuestas casi en su totalidad por hidrógeno y helio, estas galaxias primitivas comparten, curiosamente, características con otras cercanas. Este es el caso de IZw18, una de las galaxias más pobres en metales del universo cercano y que, desde hace décadas, se emplea como análoga de las galaxias primigenias.

IZw18 muestra un extenso halo de helio ionizado, una característica que se observa también en galaxias muy lejanas y pobres en metales (y que muy posiblemente también existiera en las primeras galaxias). Un halo que supone un problema: la ionización del helio requiere la presencia de objetos que emitan una radiación lo suficientemente intensa como para arrancar los electrones de los átomos de helio, y trabajos dirigidos desde el IAA pudieron descartar que el halo de IZw18 proceda de fuentes de ionización convencionales, bien sean estrellas con fuertes vientos o supernovas.

Así, quedaría la opción de que estrellas extremadamente calientes pudieran esconder la clave para resolver el problema de la excitación del helio en IZw18. Se trataría de estrellas análogas a las estrellas de primera generación (conocidas como estrellas de Población III) y que, según los modelos teóricos, podrían tener cientos de veces la masa del Sol y estarían compuestas solo por hidrógeno y helio. Sin embargo, la existencia de estrellas de este tipo aún no ha sido confirmada con observaciones.

Existen, además de galaxias como IZw18, otros tipos cuyas características las acercan a las galaxias primigenias. Este es el caso de las galaxias infrarrojas luminosas (LIRGs, por sus siglas en inglés) o de las galaxias ultraluminosas infrarrojas (ULIRGs), caracterizadas por su fuerte emisión en el infrarrojo. Su exceso de radiación infrarroja se debe a la presencia de ingentes cantidades de polvo calentado por sus intensos brotes de formación estelar, así como a la posible presencia de un agujero negro supermasivo activo en su núcleo.

La observación de estas galaxias nos permite estudiar, en el universo cercano, tasas extremas de formación estelar, similares a las encontradas en las primeras etapas del universo. El IAA lideraba en 2024 un estudio que evidenciaba el papel crucial de la fusión galáctica en la evolución química de estas galaxias y según el que, al contrario de lo que se pensaba, su proporción de elementos pesados no es muy diferente a la del resto de galaxias con menor presencia de polvo. Igualmente, hallamos que un pequeño número de ellas había sufrido un rejuvenecimiento químico: su fusión con otras galaxias las surtió de gas carente de elementos pesados, lo que diluyó su contenido en metales y disparó la formación de estrellas.

Siguiendo con los rejuvenecimientos, es destacable el curiosísimo caso de tres viejas galaxias que contradicen la creencia generalizada de que en las galaxias viejas no nacen estrellas. Las galaxias elípticas se caracterizan por su forma esferoidal, carente de rasgos destacables, y por un color rojizo que procede de una población estelar muy envejecida. Se trata de galaxias muy masivas donde la formación de estrellas se detuvo hace miles de millones de años. Sin embargo, en 2017 hallábamos en tres galaxias elípticas del universo cercano, y gracias al proyecto CALIFA, una estructura muy tenue, similar a los brazos de las galaxias espirales. Estas estructuras espirales, donde se están formando estrellas masivas, constituyen una prueba de que las galaxias elípticas, en apariencia mortecinas, aún mantienen un leve crecimiento en sus regiones externas. Lo que aún desconocemos es si estos brotes de formación estelar son sus últimos vestigios de actividad o si se trata de un rejuvenecimiento debido a la interacción con galaxias menores.

Las estrellas no solo se forman en galaxias donde no deberían nacer, sino también en regiones concretas donde su hallazgo constituye una sorpresa. La galaxia del Sombrero, que forma

parte del Supercúmulo Local (una agrupación de galaxias que incluye el cúmulo de Virgo y el Grupo Local), constituye un extraño híbrido entre galaxia espiral y elíptica, con brazos espirales y un bulbo central muy brillante. Pero, además, muestra en su halo, una región típicamente poblada por estrellas viejas, gran cantidad de estrellas ricas en metales, o pertenecientes a generaciones jóvenes. Para explicar su presencia se propuso lo que se conoce como fusión «húmeda», un escenario en el que una gran galaxia elíptica se vio rejuvenecida con grandes cantidades de gas y polvo procedentes de otra galaxia masiva, que alimentaron la formación del disco que observamos.

La búsqueda de los restos de esa fusión constituía el fin de un estudio coordinado por el IAA en 2021, que halló una gran estructura elíptica que rodea la galaxia, producto de una fusión menor con otra galaxia. Sin embargo, no encontró restos de esa fusión húmeda, que requiere la intervención de dos galaxias de gran masa, de modo que su forma y las jóvenes estrellas de su halo siguen sin poder explicarse.

Como vemos, el hallazgo de caracteres o fenómenos inesperados es una constante en prácticamente todas nuestras áreas de estudio, y en 2023 dirigíamos un estudio que descubriría, en las colas de arrastre de dos galaxias situadas en la región central del cúmulo de Hidra, NGC 3312 y NGC 3314a, abundancia de gas frío y estrellas en formación, algo anómalo, ya que se espera que el gas se pierda por su desplazamiento hacia el centro del cúmulo.

Los cúmulos de galaxias son agrupaciones de cientos o miles de galaxias unidas gravitatoriamente, que se desplazan dentro de él e interaccionan con el gas caliente que forma el medio intracumular. Las galaxias que se mueven a través de ese medio crean, de manera similar a un barco desplazándose por el agua, un «arco de choque» en el sentido en el que avanzan dejando atrás una estela de material erosionado. En última instancia, este proceso puede eliminar todo el gas frío, y el hecho de que estas galaxias posean aún un alto contenido en gas frío sugiere o bien que el medio podría protegerlas de los efectos más dramáticos de la presión de arrastre, o bien que las galaxias se mueven en órbitas más tangenciales de lo que se suponía. Además, estas colas albergan una cantidad notable de estrellas en formación, algo inaudito también: estrellas que probablemente vivirán toda su vida dentro del cúmulo, pero fuera de una galaxia.

La interacción entre galaxias se muestra en todo su esplendor en lo que conocemos como grupos compactos, o conjuntos de galaxias próximas en interacción, claves para entender el efecto de las interacciones extremas en la evolución de las galaxias desde épocas tempranas del universo. Uno de los más icónicos es el Quinteto de Stephan, que estudiamos en el IAA desde hace más de treinta años, y en torno al que podemos trazar un bello arco de conocimiento.

Cuatro de las cinco galaxias del Quinteto de Stephan forman una asociación física y probablemente se fusionarán entre sí, y en 1997 proponíamos un modelo evolutivo según el que distintas galaxias «intrusas» fueron dando forma al grupo. Veintidós años después obteníamos la imagen más profunda del grupo, que permitía desvelar estructuras de muy bajo brillo superficial, desconocidas hasta la fecha y mayormente distribuidas fuera de las galaxias del sistema, obteniendo así la mayor muestra de nubes intergalácticas ionizadas del quinteto. Además, el estudio hallaba una nueva e inesperada galaxia enana que, tarde o temprano, acabará interaccionando con el resto del grupo, lo que convertirá el sistema en un sexteto.



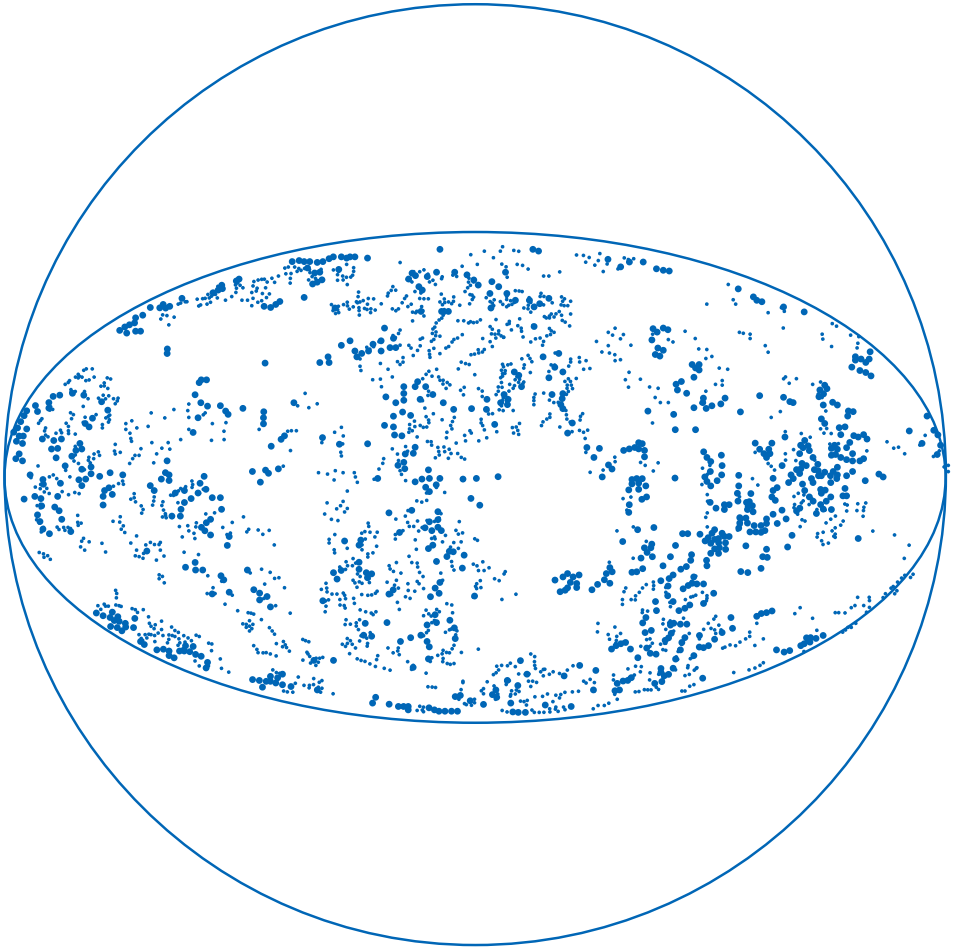
El Quinteto de Stephan, uno de los grupos de galaxias en interacción más icónicos conocidos.
Crédito: NASA, ESA, CSA, STScI.

La historia de las galaxias puede leerse, como vemos, en sus estrellas: en su composición, en el lugar donde se hallan, en su edad y, también, en su movimiento. Del mismo modo que el Sol se mueve alrededor del centro de la Vía Láctea —tarda la friolera de 230 millones de años en completar una vuelta—, todas las estrellas en las diferentes galaxias se mueven en órbitas. Algunas dibujan órbitas casi circulares y otras con movimientos aleatorios, lo que indica, respectivamente, que se formaron en discos de gas estables o, por el contrario, que pertenecen a entornos turbulentos.

Y, comparando la fracción de estrellas con distintos tipos de órbitas, podemos conocer cómo nacieron y evolucionaron sus galaxias. En 2018 participábamos en un trabajo pionero, posible gracias a datos del sondeo CALIFA, que obtenía la distribución orbital de estrellas en más de trescientas galaxias del universo local. Los datos mostraron que las rotaciones ordenadas son más abundantes en las galaxias con masas de hasta 10 000 millones de masas solares, y menos frecuentes para las más masivas. Las órbitas de movimiento aleatorio, como era de esperar, dominan las galaxias masivas, que han vivido fusiones e interacciones y que presentan masas de más de 100 000 millones de soles. Este trabajo, que constituye la mayor biblioteca de historias galácticas, hallaba así un nuevo y preciso método para leer la historia de una galaxia.

G.

COSMOLOGÍA



EL TODO...

Al igual que nuestro planeta constituye una pequeña mota azul en la Vía Láctea, nuestro Grupo Local, con sus dos galaxias gigantes, también constituye una mota dentro del universo, formado por miles de millones de galaxias que se agrupan en cúmulos y supercúmulos. Si pudiéramos hacer lo imposible y sacar una fotografía desde fuera del universo, veríamos que la distribución de galaxias en el espacio se muestra como una colección de vacíos gigantes con forma de burbuja, separados por películas y filamentos constituidos por galaxias, con los supercúmulos apareciendo ocasionalmente como nodos relativamente densos.

Pero no se trata de una disposición estática. Edwin Hubble demostró, en 1929, que las galaxias se alejan unas de otras y que además este desplazamiento aumenta con la distancia: cuanto más distantes, a mayor velocidad se alejan. Es lo que se denomina expansión del universo, un proceso que, si rebobinamos, muestra las galaxias acercándose y apunta al origen de todo: a un instante, hace unos 13 800 millones de años, en el que toda la materia y energía estaba contenida en un estado inicial infinitamente denso que experimentó una violenta expansión, origen del tiempo, el espacio y todas las agrupaciones de materia. Es lo que se conoce como Big Bang y constituye, hasta la fecha, el esqueleto teórico que mejor explica el origen del universo en el que vivimos.

Quedan, sin embargo, muchas incógnitas: para comprender el universo y anticipar su evolución debemos tener en cuenta toda la materia y energía que lo compone, y un gran porcentaje de esta es invisible o completamente desconocida. Las últimas aproximaciones indican que el universo se compone en un 68 % de energía oscura, una fuerza repulsiva que provoca el progresivo (y

acelerado) distanciamiento de las galaxias; en un 27 % de materia oscura, un tipo de materia que no emite ni refleja luz y que solo puede detectarse por su acción gravitatoria; y en un frugal 5 % de materia ordinaria, o el tipo de materia que forma las galaxias, las estrellas, los planetas y nosotros mismos.

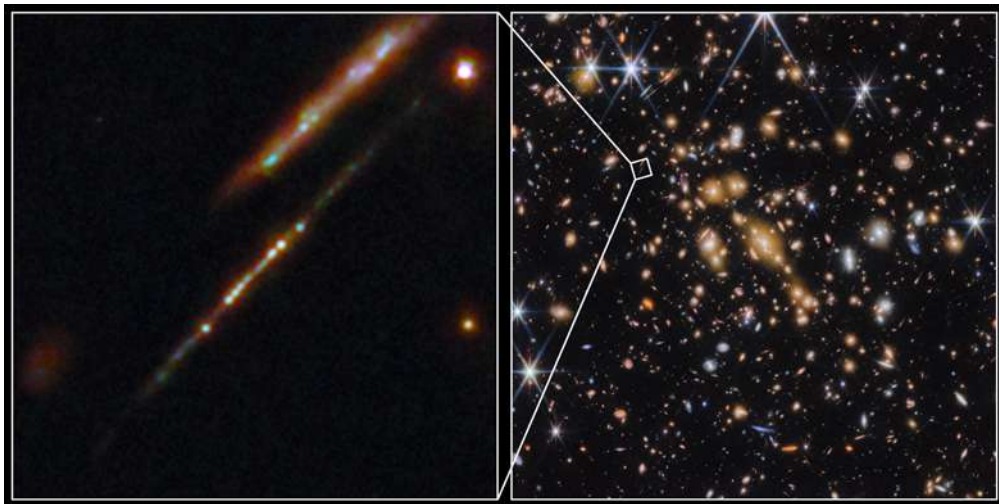
En el IAA se lleva a cabo un acercamiento a los problemas cosmológicos que incluye modelos teóricos, datos observacionales (sobre todo a través de cartografiados de galaxias a gran escala, como el proyecto J-PAS que, entre otros, establecerá restricciones a las propiedades de la energía oscura) y el desarrollo de instrumentación, que busca profundizar en la naturaleza, distribución y dinámica de las galaxias y de los cúmulos de galaxias, así como detectar y conocer la materia oscura y averiguar la naturaleza de la energía oscura y las implicaciones de su existencia.

La observación del universo lejano implica adentrarse en su pasado: debido al tiempo que la luz tarda en alcanzarnos, vemos el Sol cuando era ocho minutos más joven. Así, si la luz de una galaxia ha tardado en alcanzarnos 13 200 millones de años, estamos viéndola tal y como era en el universo primitivo. Ese es el caso de MACS 1149-JD, una galaxia muy débil y una de las más distantes conocidas, en cuyo hallazgo participamos en 2010.

El descubrimiento fue posible gracias a un afortunado alineamiento. En la trayectoria de la luz desde MACS 1149-JD hasta nuestros telescopios se halla un cúmulo de galaxias que actuó como lupa, un efecto que se conoce como lente gravitatoria, que magnificó su luminosidad y nos permitió observarla. Se calcula que esta débil galaxia pudo formarse hace unos 13 500 millones de años, lo que la sitúa en una etapa verdaderamente interesante, la de la reionización: se cree que las primeras estrellas surgieron entre los cien y los 250 millones de años después del Big Bang, y que fueron las responsables de la reionización del medio interestelar, poniendo fin a la «era oscura». La luz ultravioleta de aquellas primeras estrellas ionizó los átomos de hidrógeno neutro que poblaban el universo (y que absorbían la radiación, de ahí la «era oscura») y el universo fue, paulatinamente, haciéndose transparente a la radiación, es decir, observable. Así, galaxias como MACS 1149-JD pudieron jugar un papel fundamental en la historia del cosmos.

También gracias a una lente gravitacional pudieron hallarse, en 2024, los cúmulos estelares más lejanos y antiguos. Fue gracias al telescopio espacial JWST, sucesor del Hubble, que observó un conjunto de cinco cúmulos estelares gravitacionalmente ligados en una galaxia cuya luz fue emitida cuando el universo apenas tenía 460 millones de años. De nuevo, un cúmulo de galaxias magnificó la luz de una galaxia, en este caso conocida como arco de las Gemas Cósmicas, que permitió revelar la presencia de cinco puntos compactos distribuidos a lo largo del arco. Desde el Instituto de Astrofísica de Andalucía se desarrolló el algoritmo necesario para el análisis de la luz procedente de las Gemas, cuyos cúmulos estelares podrían ser precursores de los cúmulos globulares que actualmente observamos en la Vía Láctea.

Y, de nuevo, gracias a una lente gravitatoria pudimos contemplar, en 2022, la estrella más lejana nunca vista. Denominada Earendel, se halla tan lejos que su luz ha tardado 12 900 millones de años en llegar a la Tierra, de modo que la observamos tal y como era cuando el universo tenía solo el 7 % de su edad. El hallazgo, en el que participó el IAA, suponía un enorme salto



Arco de las Gemas Cósmicas, magnificado por una lente gravitatoria. Contiene los cinco cúmulos estelares más distantes y antiguos jamás observados.

Crédito: ESA/Webb, NASA & CSA, L. Bradley (STScI), A. Adamo (Stockholm U.) and the Cosmic Spring collaboration.

atrás en el tiempo con respecto al récord anterior —una estrella que vivió hace unos 9000 millones de años—, y proporcionaba una visión única de los albores del universo. Si Earendel, que significa «estrella de la mañana» en inglés antiguo, es una sola estrella y no un sistema doble, el equipo estima que tendría al menos cincuenta veces la masa de nuestro Sol y millones de veces su brillo, lo que la sitúa entre las estrellas más masivas conocidas.

Pero las lentes gravitatorias, que nos han permitido hallar la galaxia, los cúmulos estelares y la estrella más distantes, son fenómenos escasos, y el universo se muestra, en otras ocasiones, impenetrable. Las galaxias primigenias datan de las edades oscuras, un periodo cosmológico difícil de observar en detalle debido a la presencia, como hemos visto, de hidrógeno neutro, un gas que aumenta la opacidad del medio. Esa envoltura opaca ha impedido realizar estudios detallados de estas galaxias con los observatorios actuales.

Un equipo, con participación del IAA, adoptaba un enfoque diferente, al difundir el descubrimiento de galaxias nacientes observadas en un momento cósmico posterior, solo mil millones de años después del final de las edades oscuras, cuando el universo contaba con un 5 % de su edad actual. Este estudio, que analizó más de dos mil galaxias, halló diez de estas galaxias primigenias, que son unas treinta veces más pequeñas y unas cien veces menos masivas que la Vía Láctea, con formas compactas e irregulares.

Según la teoría cosmológica más aceptada, antes de que se formaran las galaxias ya había concentraciones de materia oscura que sirvieron de aglutinante: el gas que daría lugar a las primeras galaxias se concentró en los grumos de materia oscura, un tipo de materia que no emite luz y solo interacciona gravitatoriamente (y que sigue siendo mayoritario en galaxias y cúmulos de galaxias, en forma de enormes halos en torno a la materia luminosa).

De hecho, en los cúmulos de galaxias la proporción de materia oscura y ordinaria está en torno a cinco contra uno. Sin embargo, existen regiones extrañas, como el entorno del cúmulo PSZ2 G099.86+58.45, que presenta un halo de materia oscura con una densidad seis veces mayor de la que cabría esperar. Su estudio, en el que participó el IAA en 2018, mostró que debe haber mecanismos muy eficaces, no contemplados hasta ahora, para la acumulación de materia en torno a las grandes estructuras que pueblan el universo.

La observación del espacio profundo nos ha deparado datos que nos acercan a la imagen última, a esa estructura a gran escala del universo formada por cúmulos densos, filamentos, muros laminares y vacíos. 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. Gracias al proyecto CAVITY, en el que participamos, hemos podido estimar por primera vez la velocidad a la que las galaxias de los vacíos cósmicos forman estrellas a lo largo de su historia, y hemos hallado que evolucionan más despacio que el resto. Comprobamos, además, que las galaxias primigenias evolucionaron a la misma velocidad, independientemente de la estructura en la que se encuentren ahora, pero hace unos 11 000 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 evolutivas en las galaxias, pero sí en etapas posteriores. Vemos, así, que 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.



Imagen, a partir de simulaciones por ordenador, de una corriente cósmica.
Crédito: K. Dolag, Ludwig-Maximilians (U. München).

La estructura de filamentos de gas, galaxias y materia oscura que se extiende por todo el universo se conoce también como «red cósmica», y en 2023 participábamos en un trabajo que estudiaba uno de sus componentes: una corriente de gas que alimenta una galaxia lejana y masiva, y que apunta a la existencia de una red de suministro de material a gran escala en el universo. La corriente fluye hacia la galaxia del Hormiguero, formada por numerosas galaxias pequeñas que llegarán a fundirse en una única galaxia masiva. Una galaxia muy lejana, cuya luz emergió unos 1500 millones de años después del Big Bang.

Se cree que la red cósmica contiene principalmente hidrógeno y helio, los elementos primordiales, y la gran cantidad de carbono que alberga la corriente del Hormiguero supuso una sorpresa, ya que este elemento, como muchos otros, solo se produce en las estrellas. Es probable que la presencia de carbono signifique que la corriente arrastra pequeñas galaxias, tal y como predicen las simulaciones numéricas: las estrellas de estas pequeñas galaxias enriquecen la corriente con carbono y otros materiales antes de llegar al Hormiguero. La corriente, que abarca casi medio millón de años luz (casi diez veces el tamaño de nuestra galaxia), constituye, no obstante, una estructura pequeña comparada con la vasta escala de la red cósmica.

El estudio de este todo, del universo a gran escala, se lleva a cabo, también, mediante grandes cartografiados, como el mencionado J-PAS, y de simulaciones numéricas. Este segundo punto representa un complemento indispensable a la observación: los telescopios permiten estudiar cómo era el universo hace miles de millones de años, pero para interpretar sus datos hacen falta modelos teóricos capaces de recrear la formación y evolución de miles de millones de galaxias. Ese es el propósito de *MultiDark-Galaxies*, un universo virtual de acceso libre cuyo desarrollo hemos coordinado y que permite recrear, de manera amplia y detallada, la formación y evolución del universo: sus más de cien millones de galaxias virtuales por modelo cubren un volumen cosmológico comparable al explorado por las campañas de observación en curso y futuras. Y también hemos participado en el desarrollo de Uchuu, la simulación más exacta y completa del universo, que ofrece la posibilidad de avanzar y retroceder a lo largo de su historia prácticamente desde después del Big Bang hasta el presente.

De la mano de las observaciones, los cartografiados y las simulaciones, el estudio del universo profundo requiere del desarrollo de instrumentación específica. En este sentido, el IAA ha participado en el desarrollo de DESI, un instrumento para el estudio de la energía oscura y el universo a gran escala instalado en el telescopio Mayall del Observatorio Nacional de Kitt Peak (Arizona). DESI utiliza un conjunto de cinco mil robots giratorios, coreografiados para observar una secuencia de objetos que incluye millones de galaxias y cuásares, así como diez espectrógrafos, que medirán sus propiedades y ayudarán a identificar la distancia y velocidad a la que se alejan. Las observaciones de DESI, con un primer conjunto de datos ya publicados, proporcionarán una mirada profunda al universo primitivo hasta hace unos 11 000 millones de años.

...Y LAS LEYES DEL TODO

Hemos visto, en nuestra breve visita a Sagitario A*, que el espaciotiempo es un tejido maleable, que se curva en presencia de materia. Los escenarios de gravedad en situaciones extremas, como los agujeros negros o el mismo origen del universo, constituyen una línea de investigación en el IAA que engloba diferentes objetivos, entre ellos tender puentes entre las leyes del universo macroscópico (la gravedad) y el microscópico (la física cuántica), profundizar en el conocimiento de las ondas gravitatorias, esas «arrugas» en el espaciotiempo producidas por el movimiento de objetos muy masivos, o averiguar por qué algunas partículas elementales tienen masa cuando, según la teoría, no deberían tenerla (este es también uno de los objetivos del Gran Colisionador de Hadrones —LHC—, el mayor acelerador de partículas del mundo).

Los resultados en esta área, que maneja energías de vacío y singularidades (o lugares donde las leyes de la física pierden validez), suenan en ocasiones a ciencia ficción, como un trabajo que publicábamos en 2009 y que aludía al motor de curvatura, el mecanismo que permite a los personajes de *Star Trek* surcar el espacio más rápido que la luz, o a velocidades superluminales, mediante la distorsión del espaciotiempo.

Según la teoría de la relatividad general, nada puede viajar a más de 300 000 kilómetros por segundo, lo que impide una exploración espacial profunda: cruzar la galaxia exigiría varias decenas de miles de años. Una de las posibilidades teóricas para escapar de esta limitación era el motor de curvatura, consistente en mover el propio espaciotiempo que, en principio, puede contraerse y expandirse sin límite de velocidad. Se trata de una posibilidad que se planteó en 1994 y que incluso hizo

pensar si podría hacerse ingeniería de ella, pero nuestro estudio mostró dos efectos del motor de curvatura que imponen serias restricciones a su desarrollo, relacionados con la energía de vacío (en teoría cuántica ocurre que, aunque el estado de mínima energía es el vacío, la energía del vacío nunca es equivalente a cero: se habla de un constante nacimiento y aniquilación de parejas de partículas, tan rápido que resulta imposible detectar su presencia). De modo que no, no podemos atravesar la barrera de la luz, pero, como señalábamos al final del artículo, «quizá viajar al 99 % de la velocidad de la luz no esté tan mal, después de todo».

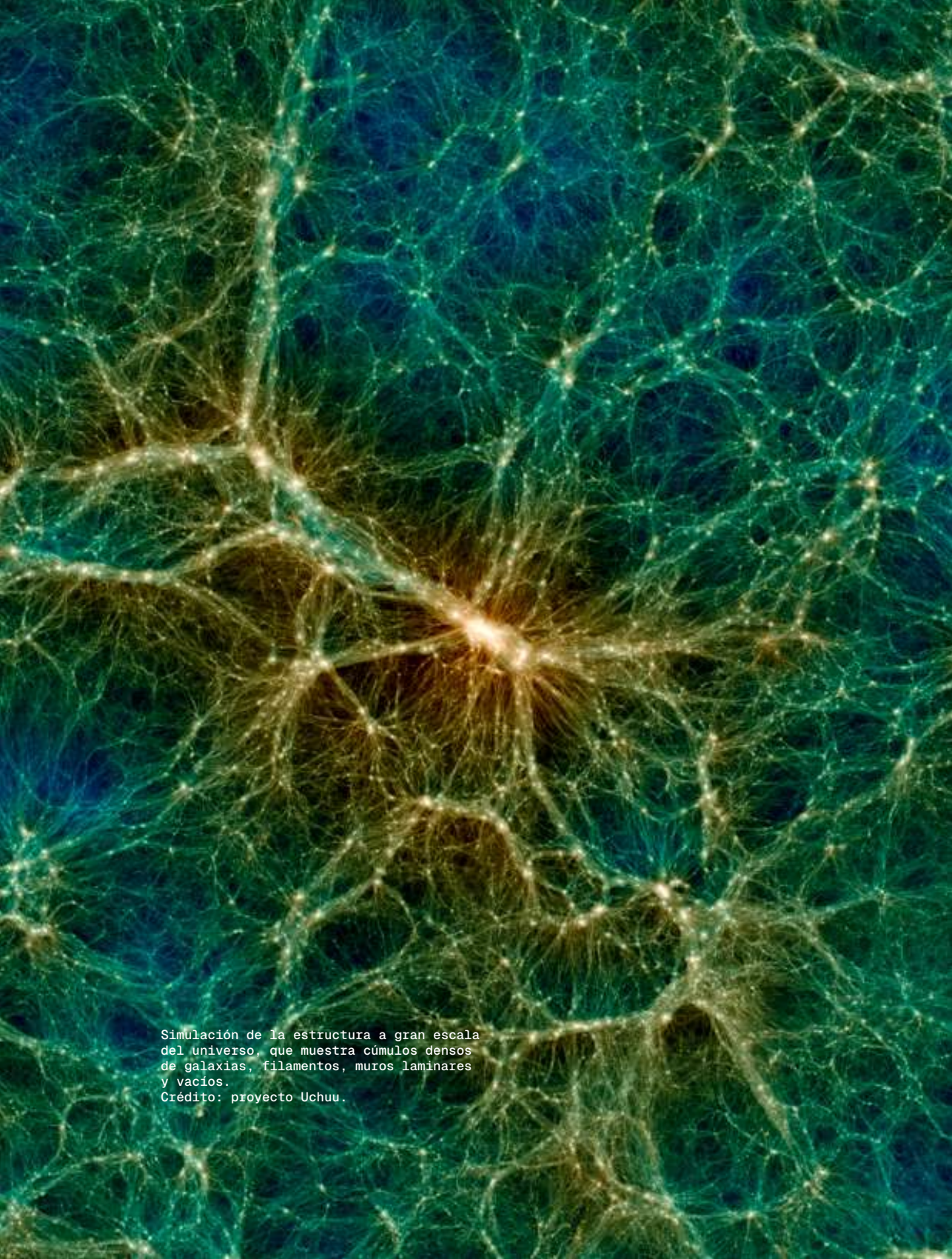
En esta línea científica, proponíamos en un estudio de 2022 una pregunta extraña: ¿estamos confundiendo un tipo muy compacto de estrellas con agujeros negros? Las estrellas pueden presentar desde densidades medias, como la de nuestro Sol, a las altísimas densidades de las enanas blancas, que pueden contener masas como la del Sol en volúmenes equivalentes al de la Tierra. Mientras que en el caso de una estrella como el Sol es el equilibrio entre la gravedad, que tiende a hundir la estrella, y la presión térmica, que tiende a expandirla, lo que mantiene estable la estructura, en el caso de las enanas blancas actúa otro mecanismo, la degeneración de los electrones. Pero el límite máximo se hallaría, según nuestro conocimiento actual basado en la relatividad general, en las estrellas de neutrones, que pueden contener dos masas solares en un diámetro de veinticuatro kilómetros y cuya estabilidad se debe a la degeneración de los neutrones. Cualquier objeto que supere ese límite debería ser un agujero negro, pero esto no tiene en cuenta la polarización del vacío, que se comporta como si hubiera una nube adicional de materia y permite que existan estrellas mucho más compactas de lo que se pensaba, con densidades similares a las de los agujeros negros (y con los que podríamos estar confundiendo este tipo de estrellas).

Este resultado, con el que terminamos nuestro recorrido por el universo, ilustra una constante a lo largo de todo el itinerario: el asombro. Vemos cómo el universo nos sorprende, aún, de diversas e innumerables formas: planetas enanos rodeados de anillos, asteroides que desarrollan colas, galaxias viejas donde aún nacen estrellas, planetas en regiones donde no deberían existir, estrellas que mueren de forma anómala, chorros en estrellas que nacen y mueren, pero, también, en agujeros negros supermasivos, danzas de parejas de agujeros negros...

Si datamos el comienzo de la astronomía moderna en 1609, año en el que Galileo apuntó con un telescopio al cielo, obtenemos más de cuatro siglos de generaciones humanas dedicadas a estudiar el universo. Así, cuando el Instituto de Astrofísica de Andalucía comenzó su andadura en 1975, ya disponíamos de modelos y teorías que explicaban el Sistema Solar, las estrellas, las galaxias e incluso el universo a gran escala. Pero, a lo largo de estos cincuenta años, hemos aportado piezas nuevas a esos modelos, que en muchas ocasiones exigen cambios de paradigma, como en el caso de las explosiones de rayos gamma o los planetas extrasolares; hemos observado fenómenos antes desconocidos, como los eventos luminosos transitorios de nuestra atmósfera; hemos atisbado regiones que creíamos inalcanzables, como el corazón de la Vía Láctea, y obtenido imágenes de objetos imposibles, como los agujeros negros o el universo primigenio. También hemos llegado a lugares insólitos: hemos aterrizado en una luna de Saturno, acompañado a un cometa en su órbita, estamos viendo las regiones polares del Sol...

Este centro de investigación, que hace cinco décadas fundó un grupo de personas entusiastas y valientes, se ha convertido en uno de los institutos de astrofísica y ciencia espacial de referencia en Europa. Y el universo que concebíamos entonces, un puzle más o menos ordenado, se ha revelado mucho más complejo y rico de lo que pensábamos. Y con muchas, muchísimas más piezas.

Ante la bellísima idea que ha caminado a nuestro lado durante todo el recorrido, la del asombro perpetuo, terminamos este paseo de la única manera posible: con una enhorabuena agradecida a todas las personas que han hecho posible este medio siglo de ciencia fascinante, con un recuerdo cariñoso para quienes no están y con una alegre bienvenida para quienes vendrán. Estos cincuenta años muestran que queda muchísimo por hacer.



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

UN POCO DE HISTORIA

José María Quintana González

La década de los setenta del siglo pasado puede identificarse, sin lugar a dudas, como el momento en el que comienza el auge de la astronomía moderna en España. Los nuevos telescopios que se fabricaban entonces en Europa debían ser instalados en lugares excelentes para la observación astronómica, lo que colocó a nuestro país en una situación de privilegio: Reino Unido, Alemania, Suecia y Holanda, entre otros países europeos, comenzaron a interesarse por las condiciones astronómicas de algunas regiones de nuestra geografía.

Algunas zonas de las islas Canarias y del sureste de la Península destacaron de forma clara entre un conjunto muy amplio de lugares potencialmente interesantes, y fue en ellas donde comenzaron a instalarse los grandes complejos observacionales europeos del hemisferio norte. La Palma, Tenerife, Almería y Granada constituyen las sedes de los observatorios más importantes de Europa.

Sin embargo, la astronomía en España era por entonces muy precaria, a pesar de que a mediados de los años sesenta se había iniciado ya un intento de modernización del sector. Tanto en Canarias como en la Península se habían llevado a cabo notables esfuerzos para tratar de revitalizar viejas instalaciones (como el Observatorio de Cartuja, en Granada), o para reconducir otras más recientes hacia líneas de trabajo más novedosas y competitivas (como el Observatorio del Teide, en Tenerife). De cualquier forma, estas acciones se realizaron en condiciones muy poco favorables y su alcance se redujo a unos límites modestísimos, que no presagiaban un cambio tan importante como el que se produjo.

Este estado de la cuestión subyacía en el planteamiento que el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) se hacía a la hora de abordar la posible potenciación de la astronomía, una disciplina tradicionalmente muy modesta dentro del Patronato Alfonso el Sabio, por entonces en pleno vigor y que abarcaba ciencias matemáticas, médicas y de la naturaleza. La existencia de pequeños y activos grupos de investigación en las universidades de La Laguna y Granada resultó ser un factor decisivo a la hora de que el CSIC decidiese la creación de los Institutos de Astrofísica de Canarias (IAC) y Andalucía (IAA), con sedes en La Laguna (septiembre de 1975) y Granada (julio de 1975), respectivamente.

En lo que a Granada se refiere, el CSIC había apoyado desde los años sesenta una iniciativa llevada a cabo por la Compañía de Jesús, propietaria del Observatorio de Cartuja. Este observatorio, fundado en 1902, disponía en esa época de una estación de montaña situada en Sierra Nevada, en el Mojón del Trigo, a 2605 metros de altitud. Una instalación que contaba con un pequeño telescopio de treinta y dos centímetros de apertura que era utilizado conjuntamente con el Royal Greenwich Observatory para llevar a cabo estudios de fotometría estelar. En 1971 se estableció un convenio entre la Compañía de Jesús y la Universidad de Granada, en virtud del cual el Observatorio de Cartuja pasaba a depender de la Universidad.

Hasta 1975 se habían llevado a cabo en el Observatorio de Cartuja tres tesis doctorales y cuatro de licenciatura. En esa época, se había convenido ya la creación del Centro Astronómico Hispano Alemán de Calar Alto (CAHA, Almería), a la vez que habían sido establecidas las bases para la construcción del Observatorio de Pico Veleta, estación de observación del Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM), en una zona próxima al actual emplazamiento del Observatorio de Sierra Nevada en la Loma de Dilar.

La propuesta de creación del IAA, realizada por el CSIC en julio de 1975, tomaba en cuenta esta situación y asumía, como uno de los factores clave para que el nuevo instituto pudiese adquirir una personalidad científica, la necesidad de disponer de medios propios de observación que, aunque modestos, pudieran permitir la realización de programas intensivos sobre líneas de investigación propias.

Naturalmente, esto no constituía una forma exclusiva de actuación, pero sí la preferente. Únicamente trataba de subrayar la necesidad de aportar puntos de vista propios en este campo de la actividad científica, lo que se consigue con más facilidad si se dispone de instrumental, infraestructura y capacidad de actuación propias, independientemente de las necesarias e importantes colaboraciones con otros centros.

Cuando se hace referencia al inicio del IAA se ha destacado la dureza del punto de partida, así como la de los primeros pasos en su andadura. Al contrario de lo que sucedía en La Laguna, la Universidad de Granada no participó directamente en el proyecto del IAA, con lo que el instituto —sin infraestructura propia, con una mínima dotación económica, con muy escaso personal y sin un lugar físico en el que albergarse— puede decirse que partió de cero.

Después de múltiples dificultades, en febrero de 1976 el IAA encontró una sede provisional en el Palacio de la Madraza (Granada), edificio en el que Yusuf I creó en el siglo XIV la primera madraza árabe, traducción islámica del concepto de universidad de la Europa cristiana. En esta sede provisional el IAA continuó creciendo en personal contratado y becario, resolviendo con buen ánimo las muchas dificultades que en cada momento surgieron y llevando a cabo un trabajo calificado como excelente, a la vez que enormemente generoso.

La disponibilidad de instrumentos de observación propios se resolvió por medio de un acuerdo entre la Universidad de Granada y el CSIC, en virtud del cual todos los instrumentos disponibles en el Observatorio de Cartuja quedaron a disposición del IAA sin restricción alguna, a la vez que se habilitó una vía de colaboración científica entre el personal del IAA y el de la Universidad. Gracias a ello se pudo disponer de medios de observación propios que, aunque modestos, permitieron al IAA alcanzar con éxito la idea de instituto de investigación moderno que se pretendía.

En esa primera etapa destaca también el enorme esfuerzo dedicado a crear un grupo de instrumentación que trabajara en proyectos espaciales para medir in situ emisiones de la atmósfera por medio de cohetes de sondeo. Los resultados obtenidos desbordaron las mejores previsiones, iniciándose así tareas que hoy han sido ya plenamente acreditadas en nuestro instituto.

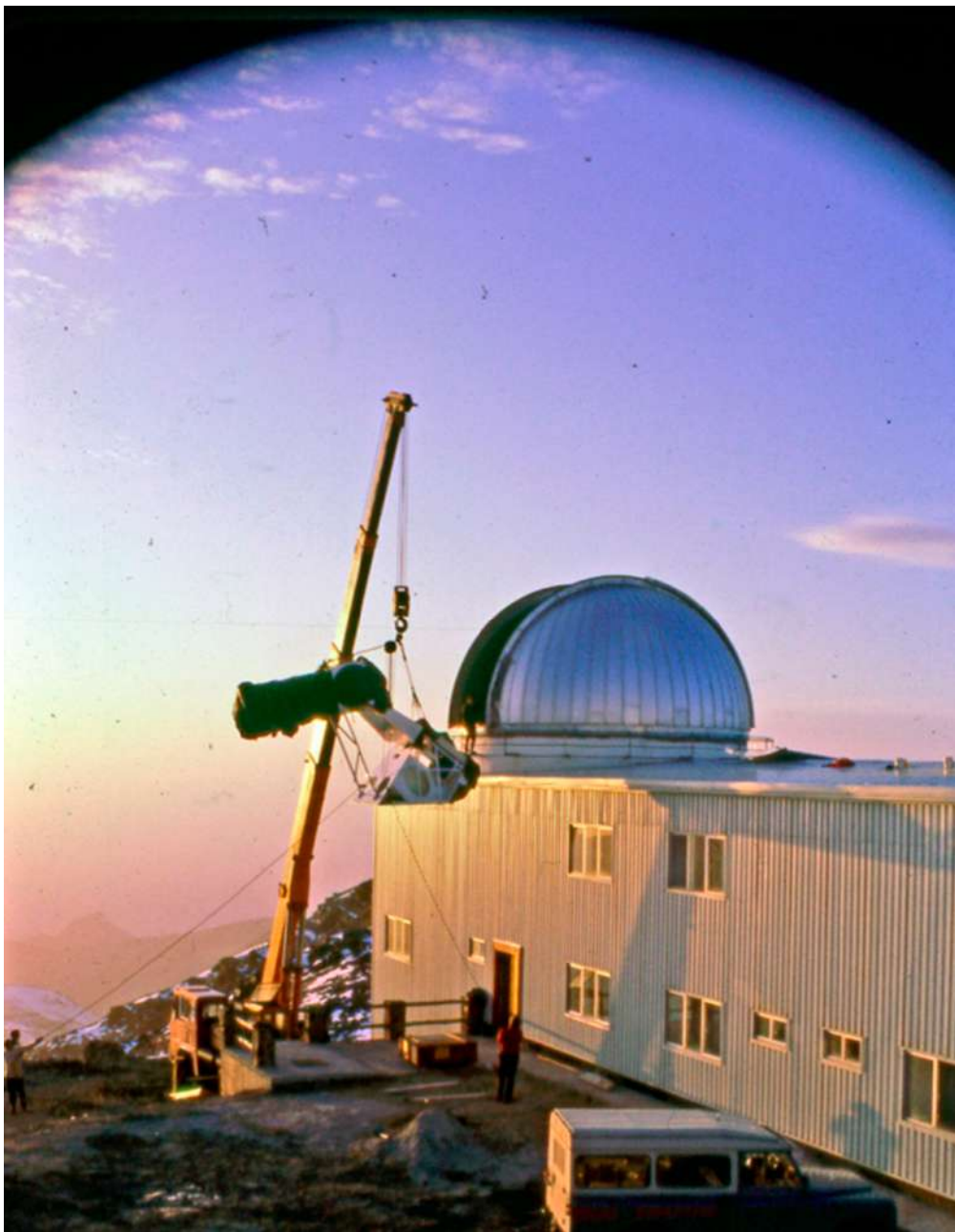
En 1978 el IAA se trasladó a uno de los edificios que el propio CSIC posee en Granada, situado dentro del complejo de la Estación Experimental del Zaidín (EEZ). La necesidad de poseer unas instalaciones observacionales propias se concretó en sendas negociaciones con el Royal Greenwich Observatory (RGO) y el Observatoire de Nice, que finalmente fructificaron en sendos convenios entre el CSIC y el Science & Engineering Research Council (SERC) inglés, por una parte, y el propio CSIC con el Centre National de la Recherche Scientifique francés, por otra. Así, el CSIC se comprometía a la construcción del Observatorio de Sierra Nevada (OSN) en la falda del pico Veleta, y las instituciones extranjeras en contrapartida cedían sendos telescopios, de 75 y 70 centímetros respectivamente, para que se instalaran en el observatorio y fueran explotados conjuntamente. Esta situación llevaba consigo también la necesidad de que el IAA se procurara nueva instrumentación, parte de la cual se desarrollaría dentro del propio instituto.

Al mismo tiempo se intensificaron los esfuerzos para disponer de instalaciones definitivas en la ciudad de Granada, específicamente adaptadas a las peculiaridades de un instituto de astrofísica volcado hacia el futuro. Así, el CSIC finalmente aprobó la construcción de un edificio en unos terrenos que la propia institución poseía, cerca de la carretera de acceso a Sierra Nevada, para así facilitar el tránsito desde Granada al observatorio. Este edificio fue inaugurado en 1986 y, desde entonces, ha ampliado sus instalaciones debido a las necesidades de todo tipo que han ido apareciendo: suma ya tres edificios y, en breve, contará con un cuarto.

La situación del Observatorio de Sierra Nevada, aunque mejor que la que inicialmente se afrontó en el Observatorio de Cartuja, distaba mucho de ser satisfactoria, por lo que también en este campo se trató de conseguir una solución duradera. Se buscó disponer de instrumental de observación que fuese propiedad del instituto para evitar los condicionamientos técnicos derivados de las cada vez más bajas prestaciones de los viejos telescopios disponibles.

La idea tomó cuerpo definitivamente con un programa en el que el CSIC y la Academia China de las Ciencias se comprometían a colaborar en la construcción de dos telescopios de 0.9 y 1.5 metros, así como los equipos de control correspondientes, en unas condiciones económicas muy favorables para el CSIC. Firmados los acuerdos en 1987, la instalación de los dos telescopios en el OSN comenzó en el verano de 1991.

Con la instalación de los dos nuevos telescopios se puso punto final a una primera fase de dotación de instrumental básico, colocando al IAA en disposición de afrontar los nuevos retos científicos y técnicos que le eran propios. Unos retos que nos llevan al día de hoy, en el que el IAA cuenta con líneas que estudian prácticamente todas las áreas de la astronomía, con una unidad de desarrollo instrumental activa tanto en proyectos espaciales como en tierra y con una posición privilegiada en el panorama astrofísico internacional.



Construcción del observatorio de Sierra Nevada

50 AÑOS DEL IAA: UNA BUENA MOVIDA

Emilio J. Alfaro

Manolo Sáez y Arturo Polls, *in memoriam*

El Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA) cumple cincuenta años, y es difícil no ponerse nostálgico. En mi caso, llevo cuarenta y nueve de ellos vinculado, de una forma u otra, a este centro astronómico que me formó como investigador y donde sigo dedicándome a lo que más me gusta: escudriñar los cielos, desentrañar sus secretos y compartirlos tanto con colegas como con el público.

Pero todo tiene un inicio, y el mío se remonta a 1976, cuando Manolo Sáez Cano y yo aterrizamos en el Palacio de la Madraza tras terminar la licenciatura en Física en Sevilla. Buscábamos trabajo, y José María Quintana nos recibió con la inefable frase: «Aquí hay trabajo, pero no dinero». Con esa alentadora bienvenida, podríamos haber salido corriendo, pero nos quedamos y nos sumergimos en una aventura en la que, además de aprender astrofísica, tuvimos que inventar el significado de ser astrónomo en España.

Porque, seamos claros: en aquella época, la astronomía en nuestro país era poco más que una anécdota. Algunas instituciones ofrecían una astronomía de servicio, y unos pocos pioneros, que habían emigrado para aprender el oficio, intentaban a la sazón recuperarla dentro de nuestras propias fronteras.

Tuvimos suerte. En 1975, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) creó el IAA, impulsado principalmente por la instalación del Observatorio Astronómico Hispano-Alemán en Calar Alto (Almería). Su misión era clara: aprovechar al máximo esta infraestructura puntera en el hemisferio norte y, de paso, formar una nueva generación de astrónomos. Y ahí estábamos nosotros, un grupo de jóvenes entusiastas que, sin saberlo, íbamos a protagonizar la *movida* del IAA.

El núcleo duro lo formaban José María Quintana, Ángel Rolland, Eduardo Battaner y Pilar López de Coca, junto a Víctor Costa, Pepe Juan López Moreno, Rafa Garrido, Rafa Rodrigo, Lorenzo Gómez, Antonio Delgado, Juanjo (ahora Yusuf), el hermano Merlo, «Curro» Verdegay, Nicolás Pérez de la Blanca, Miguel Giménez Yanguas, Javier Algarra y algunos más cuyo nombre no recuerdo ahora. Éramos un grupo variopinto, inquieto... e inestable, pero con muchas ganas de hacer cosas. Y, de alguna forma, incorporamos la astrofísica a la ola de ilusiones que el final de la dictadura había generado en el país.

Mi formación científica comenzó casi sin darme cuenta. Entre el Observatorio del Mojón del Trigo en Sierra Nevada, la sede del Palacio de la Madraza y el Albaicín de Granada, la ciencia y la vida se entremezclaban de una forma difícil de describir. Si tuviera que elegir una única palabra, diría que fue... *divertido*.

Las subidas al observatorio eran toda una experiencia. No había agua corriente, el baño tenía vistas panorámicas y, en invierno, lavarse la cara con las aguas de la Hoya de la Mora era una terapia de choque que dejaba en ridículo cualquier café con extra de cafeína. Pero el telescopio, el fotómetro y su salida analógica eran excelentes, y con ellos conseguimos nuestros primeros datos de calidad.

Entre tanto, en Granada debatíamos acaloradamente los resultados científicos, alternando con competiciones de eslalon ciclista en el patio de la Madraza o aguantábamos abrazados a las frías columnas de mármol para ver quién resistía más sin poner los pies en el suelo. Y si teníamos que diseñar los próximos proyectos científicos, siempre quedaba la opción de hacerlo en las míticas timbas de mus organizadas en casa de Ángel y Pilar o Eduardo, después de que hubieran dado de cenar a los becarios. La ciencia avanza mejor cuando se trata bien a los becarios.

El Carmen de San Luis Alto número 12, que podríamos considerar el primer departamento no oficial de Astrofísica y Física de Partículas de Granada, compartido con Arturo Polls, era el refugio amable de los astrónomos y *particularos* que visitaban Granada. Mucha ciencia, mucho jazz y muchas historias guardan sus muros.

En 1978 llegó la mudanza de La Madraza a la Casa Blanca de la Estación Experimental del Zaidín (EEZ). Yo, por cosas de la tesis (un viaje a Suiza en otoño), me la perdí. Aún hay quien me lo recuerda. Pero la EEZ nos acogió con los brazos abiertos hasta que, en 1986, se inauguró el edificio actual del IAA.

Hacia 1979, el instituto ya tenía cierto aire de solidez. Contábamos con una secretaria de dirección, Pilar Sánchez Saavedra, lo que nos daba un toque de *institución seria*. Nuevos compañeros se habían sumado al equipo: Pepe García-Pelayo, mi director de tesis junto a José María Quintana, que había dejado la UCM para unirse al IAA, y Álvaro Giménez Cañete, quien también comenzaba la tesis bajo su dirección.

Los tres compartíamos despacho y, además de a la ciencia, nos entregábamos a otro tipo de lecturas que, cada mañana, comentábamos con la misma pasión con la que luego debatíamos sobre nuestros proyectos. Viéndolo con la perspectiva del tiempo, no sé si era realmente una época dorada o si la nostalgia me engaña, pero lo cierto es que recuerdo esos años como maravillosos. En junio de 1981, Manolo Sáez, Álvaro Giménez y yo defendimos la tesis en la Universidad de Granada y cada uno tomó su rumbo.

Hoy, medio siglo después del nacimiento del IAA, es imposible mirar atrás sin una mezcla de asombro, gratitud y una buena dosis de humor. Lo que empezó con la frase «Aquí hay trabajo, pero no dinero» se convirtió en una institución científica de referencia nacional e internacional, con investigadores, observatorios y proyectos que han contribuido de forma indudable al avance de la astrofísica.

Y, aunque los tiempos hayan cambiado y los baños ahora tengan agua corriente, el espíritu de la *movida* del IAA sigue vivo. Porque, al final, lo más importante no son solo los descubrimientos científicos, sino la forma en que los hemos obtenido y los colegas con quienes hemos vivido esta aventura increíble, apasionante y divertida. Nunca os estaré lo suficientemente agradecido.

¡Por muchos más años de cielos despejados, ciencia apasionante y, por qué no, alguna que otra partida de mus!



FOTO 01

Verano de 1978. Excursión a la cumbre del Veleta con motivo del curso de Fotometría impartido por el Prof. Uli Steinlin (Instituto de Astronomía de la Universidad de Basilea). De derecha a izquierda y de delante a atrás: 1ª fila; Eduardo Simmoneau (Observatorio de París). 2ª fila; Emilio J. Alfaro (IAA), Uli Steinlin (Universidad de Basilea), Sebastián Vidal (IAA), Ángel Rolland (IAA) y Eduardo Battaner (IAA-UGR). 3ª fila; Mamen Morales (INTA), Lola Sabau (INTA) y Pepe García-Pelayo (UCM). Nótese la colleja que mi director de tesis está a punto de propinarle a mi director de tesina.

FOTO 02

Defensa de la tesis en junio de 1981. En la fila de la derecha, de delante a atrás: Manolo Sáez, Álvaro Giménez, Emilio J. Alfaro y Eduardo Battaner. En la fila de la izquierda, de delante a atrás: Jesús Biel, Paco Sánchez, Juan Orús y Ramón Canal.

INICIOS DEL IAA

Pilar López de Coca

EA finales del siglo XIX, los jesuitas construyeron el Observatorio de Cartuja. A mediados de la década de 1960, comenzaron a considerar Sierra Nevada como un buen lugar para la observación astronómica. En 1965 se inició la construcción del observatorio en el Mojón del Trigo (OMT), situado a 2605 metros de altitud. En colaboración con la Universidad Jesuita de Georgetown (EE. UU.), se instaló un telescopio reflector KYOTO de 32 cm de tipo Cassegrain. El principal instrumento de medición era un fotómetro fotoeléctrico, basado en un fotomultiplicador 1P21 y equipado con una rueda de filtros manual con los filtros U, B, V del sistema Johnson. En 1969, el Observatorio de Greenwich actualizó el fotómetro, reemplazando el fototubo por un EMI y suministrando un amplificador electrométrico con registro analógico gráfico. Este telescopio estuvo en funcionamiento hasta mayo de 1980, cuando una rotura en el cable de la luz dejó inoperativo al OMT.

En 1971, el Observatorio de Cartuja pasó a formar parte de la Universidad de Granada, adoptando el nombre de Observatorio Universitario de Cartuja, con tres secciones: Astronomía, Sismología y Meteorología. J. M. Quintana fue designado secretario general, y allí disponíamos de instalaciones para desarrollar nuestro trabajo. Como profesores universitarios, hacíamos campañas de observación principalmente en verano, ya que la docencia resultaba incompatible con las sesiones nocturnas. Sin embargo, en ocasiones también observábamos en invierno, organizando sustituciones para cubrir nuestras clases.

Fue una época muy entrañable, impartíamos clases durante el curso académico y durante los veranos observábamos en el OMT. Un observatorio que carecía de agua corriente, ya se puede uno imaginar las dificultades que eso conlleva. Siempre estaremos muy agradecidos a D. Antonio Zayas, director del Albergue Universitario, que nos hizo las estancias más llevaderas y nos ayudó en todo lo necesario.

Corría el año 1975, éramos profesores del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias en la Universidad de Granada: José M.^a Quintana, Ángel Rolland, Eduardo Battaner y yo. En julio de ese mismo año, el CSIC crea el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), al que se incorporan José M.^a y Ángel, mientras que Eduardo Battaner, aunque permanece en la universidad, se encarga de la dirección del grupo de Aeronomía. En enero del año siguiente, me incorporo al IAA como contratada, junto a Víctor Costa, quien provenía del Departamento de Microbiología de la misma facultad, y Rafael Garrido, quien se convierte en el primer becario del instituto. Me considero parte de los «creadores» del IAA; hicimos un gran esfuerzo y sacrificio,

teniendo en cuenta las condiciones de entonces, forjamos poco a poco «el germen» de un gran centro de investigación, del que este año se conmemoran los cincuenta años de su creación.

Aún no existía el IAA cuando comenzamos a buscar un lugar alternativo al OMT para la construcción de un nuevo observatorio, ya que este presentaba deficiencias importantes. Además, comenzó la degradación del cielo, ya que la capa de inversión empezó a ascender. Durante el invierno de 1974, exploramos varios emplazamientos, como el pico del Almirez y, sobre todo, el pico del Chullo, a 2611 metros de altitud, cerca del Puerto de La Ragua, a unos 80 km de Granada. Sin embargo, la falta de infraestructuras en los alrededores y la escasez de recursos económicos nos llevaron a desistir de esta opción. Tras la creación del instituto, volvimos a considerar la posibilidad de ubicar un observatorio en Sierra Nevada, pero a mayor altitud. Finalmente, elegimos la Loma de Dílar, en la falda noroeste del Veleta, por ser la mayor altura accesible, contar con infraestructuras cercanas (acceso, electricidad, agua) y disponer de la mejor climatología conocida.

Tuvimos muchas dificultades al inicio del IAA. El primer problema se presentó en el mes de enero, al no disponer de una sede donde comenzar, pues tuvimos que desalojar el Observatorio de Cartuja. El 22 de enero se firmó en Madrid un convenio de colaboración entre el CSIC y la Universidad de Granada, en el cual se decidió que el emplazamiento provisional más adecuado sería el edificio donde se encontraba la delegación del CSIC. Este edificio, el Palacio de la Madraza, de gran valor arquitectónico e histórico (datado en el siglo XIV), contaba con algunas dependencias, entre ellas dos habitaciones sin ocupar, que fueron acondicionadas para albergar al centro, y que dio inicio así a nuestra actividad. Lo primero que hicimos fue solicitar material de oficina, como mesas, sillas y armarios, ya que no disponíamos de ninguno. Además, el edificio carecía de calefacción. Ante la demora en la llegada del material, fue necesario buscar soluciones, y fue el hermano Merlo junto con Ángel Rolland quienes, al no contar con recursos, trajeron de la abandonada Facultad de Teología mesas, sillas y tableros para fabricar estanterías.

A pesar de que ya poseíamos lo más indispensable para empezar a trabajar, las condiciones en las que llevábamos a cabo nuestra actividad se hacían especialmente duras, sobre todo por los problemas derivados de la falta de calefacción.

En junio, ante la imposibilidad de seguir operando en las dos habitaciones del edificio de la delegación del CSIC, ocupamos de forma provisional los locales en el piso inferior, destinados inicialmente a la vivienda del conserje, que aún no habían sido habilitados. En esos espacios se instalaron el taller y el laboratorio de electrónica, con Sebastián Vidal Pezzi como responsable, quien se unió al equipo en ese momento.

En 1977, la situación de las instalaciones del IAA en la Madraza se complicó debido a la falta de espacio. Ese año, comenzaron los trabajos para acondicionar nuevos locales propiedad del CSIC, situados dentro del complejo de la EEZ (Estación Experimental del Zaidín). Nos mudamos a estas nuevas instalaciones en 1978.

Todos los que iniciamos la historia del IAA recordamos esa época como la más agradable, la más entrañable y amigable, un tesoro de época vivida.



FOTO 01
Vista aérea del Observatorio del Mohón del Trigo (1967), a la derecha bajo los Peñones de San Francisco, el Albergue Universitario.

FOTOS 02 (Abajo izq.)
En el salón (o saloncito) del Observatorio del Mohón del Trigo. A la izquierda, Sebastián Vidal y Ángel Rolland; a la derecha, Víctor Costa

FOTO 03 (Abajo dcha.)
De izquierda a derecha, José M. Quintana, Eduardo Battaner, Pilar López de Coca, Víctor Costa, Ángel Rolland (2011).

DE LANZAR COHETES ATMOSFÉRICOS A SOBREVOLAR MARTE, JÚPITER Y HASTA UN COMETA

José Juan López Moreno

La historia comienza en 1976, cuando, recién creado el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), la Comisión Nacional de Investigación Espacial (CONIE) abrió un proceso de selección de proyectos científicos para el uso de instrumentación a bordo de cohetes de sondeo. La idea nos pareció excelente, ya que el estudio de la atmósfera terrestre utilizando instrumentación en tierra era uno de los pilares de la investigación llevada a cabo por varios de los fundadores del IAA, entre ellos José María Quintana, cuya tesis doctoral se basaba en la interpretación de las observaciones de las emisiones del oxígeno atómico atmosférico, y mi propio trabajo de fin de carrera, también basado en las observaciones realizadas por un fotómetro multicanal instalado en Sierra Nevada. La posibilidad de estudiar *in situ* el origen de esas emisiones en varias longitudes de onda nos pareció una oportunidad que no podíamos dejar escapar.

Acudimos a dicho proceso de selección con un proyecto científico titulado «Luminiscencia Nocturna», que fue aprobado y financiado por CONIE. Su objetivo era el estudio de las emisiones infrarrojas de la atmósfera mediante la utilización de instrumentación a bordo de cohetes de sondeo. Para llevar a cabo este trabajo, Lorenzo Gómez, ingeniero electrónico por entonces adscrito al IAA, y yo mismo, encargado de la parte científica, nos trasladamos a la Universidad de Saskatchewan (Canadá). En ese momento, este centro era uno de los pioneros en el desarrollo de esta tecnología, y allí pudimos contar con la ayuda y experiencia del profesor Llewellyn, un científico muy relevante en alta atmósfera.

El proyecto tenía como reto tecnológico la fabricación de dos instrumentos, cada uno compuesto por cuatro radiómetros en el infrarrojo cercano, con longitudes de onda entre 1.27 y 1.68 micras, para estudiar las emisiones del O_2 y del OH atmosférico a altitudes de entre 60 y 110 km. Con la colaboración del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), se fabricaron los dos instrumentos, que fueron certificados para vuelo por el INTA. El primero de ellos fue lanzado a bordo de un cohete Petrel el 19 de diciembre de 1981, desde el campo de El Arenosillo (Huelva), y alcanzó un apogeo de 106.4 kilómetros. Todo funcionó a la perfección. Obtuvimos datos tanto en la subida como en la bajada, lo que nos permitió, entre otras cosas, ayudar a entender el origen de un problema que había echado a perder algunos experimentos en el *Shuttle*. Este fue un resultado adicional, ya que el objetivo principal era obtener la medida de esa contaminación en cuatro regiones espectrales y esclarecer la razón detrás del exceso de luminosidad que encontramos, el cual se debía a una fluorescencia causada por la interacción del oxígeno atómico atmosférico con restos carbonados en la superficie del vehículo. Fue un maravilloso inicio de una carrera en el conocimiento que continúa.

En 1990, tras el éxito de las misiones con cohetes de sondeo y conforme el IAA comenzaba a hacerse un nombre a nivel internacional, la Agencia Federal Espacial Soviética y la Agencia Espacial Europea (ESA), que iniciaban un ambicioso proyecto de exploración de Marte (*Mars 94/96*), nos invitaron a participar en uno de los instrumentos dedicados al estudio de la atmósfera y la superficie del planeta: el Planetary Fourier Spectrometer. El IAA se encargó del diseño y fabricación de la electrónica de control del instrumento, además de participar científicamente como coinvestigadores. Sin embargo, *Mars 96* no logró salir de la órbita terrestre, dejándonos sin misión. Poco después, la ESA retomó el proyecto y propuso una nueva misión a Marte, basándose en los modelos de repuesto de algunos instrumentos desarrollados para *Mars 96*. Así nació *Mars Express*, que fue lanzada con éxito en 2003, entró en órbita alrededor de Marte y sigue allí, sondeando su atmósfera y su superficie.

Mientras se desarrollaban las misiones a Marte, una misión de ensueño se cruzó en nuestro camino: *Cassini-Huygens*, un viaje al sistema de Saturno con una sonda que aterrizaría en Titán. El instrumento HASI, a bordo de la sonda *Huygens*, fue coproducido entre Italia, Francia y España (IAA, INTA y UPM). Tras un viaje de siete años, logró aterrizar con éxito en Titán en enero de 2004. Allí, detectó una ionosfera, tal como había previsto un modelo teórico desarrollado en el IAA. Un logro espectacular.

En diciembre de 2001 se puso en funcionamiento SABER, uno de los cuatro instrumentos a bordo del satélite TIMED de la NASA. El Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA) participó en la misión a nivel de coinvestigadores, contribuyendo al estudio de los procesos fundamentales de la mesosfera y la baja termosfera. Desde su lanzamiento, SABER sigue operativo y ha recopilado más de diecisiete años de datos.

Después de *Cassini-Huygens*, llegó otra misión ambiciosa: *Rosetta*. Su objetivo era alcanzar el cometa Churyumov-Gerasimenko, ponerse en órbita a su alrededor y acompañarlo desde casi la órbita de Júpiter hasta su perihelio. En este proyecto, el IAA participó en dos instrumentos: OSIRIS, una cámara múltiple, y GIADA, un conjunto de sensores destinados a estudiar las propiedades del polvo cometario. La misión fue un éxito total.



De izquierda a derecha: Sebastián Vidal Pezzi, Antonio López Jiménez, José Juan López Moreno y Luis Costillo Iciarra. En el centro la carga útil FOCCA que se lanzó en un cohete Petrel desde la base de El Arenosillo.

Una nueva misión a Marte y otro instrumento en cuyo desarrollo ha participado el IAA es NOMAD, a bordo de TGO-*ExoMars*, que se encuentra en órbita alrededor del planeta. Este instrumento ha resuelto el problema de la existencia del metano en Marte, ofreciendo una solución a las controvertidas publicaciones sobre presuntas detecciones. Tras varios años de trabajo y más de 100 000 espectros analizados, los resultados indican que, en caso de existir metano en Marte, su concentración está por debajo de 0.05 ppbv, es decir, entre 20 y 2000 veces menor que las cifras que habían sido reportadas en las supuestas detecciones previas.

Y esto solo fue el principio. Detrás vinieron y vienen misiones maravillosas: *BepiColombo* en las fases finales para entrar en órbita de Mercurio; *Solar Orbiter*, camino del Sol; JUICE, en ruta hacia el sistema de Júpiter; PLATO, esperando ser lanzada para detectar y caracterizar exoplanetas; DUSTER, para estudiar el papel del polvo en el universo. Y así, seguiremos aportando nuestra ciencia y nuestra tecnología al desarrollo de la exploración espacial.

UNIDAD DE DESARROLLO INSTRUMENTAL Y TECNOLÓGICO (UDIT)

Miguel Abril

La Udit desarrolla tecnología para instrumentación científica y ofrece apoyo técnico a los departamentos de investigación del IAA. Dispone de un taller de mecánica y dos salas limpias de clase ISO 8. Además, cuenta con varios laboratorios de óptica, electrónica y software, así como con otros especializados en la medida de parámetros específicos para estudios astrofísicos. Entre ellos destaca el Laboratorio de Polvo Cósmico, diseñado específicamente para medir experimentalmente la dependencia angular de la radiación dispersada de muestras de polvo, incluyendo su polarización (lo que se conoce como matriz de scattering).

Software

Se ofrecen soluciones integrales (análisis, diseño, integración y verificación) de software de control de instrumentación, basadas en dispositivos reconfigurables (FPGA), microcontroladores, DSP, sistemas embebidos con sistemas operativos ligeros y procesadores de última generación. También se trabaja el desarrollo completo de software de procesamiento y análisis de datos obtenidos durante las misiones espaciales y las observaciones terrestres, basado en entornos de procesamiento de datos de altas prestaciones (HPC).

Óptica

Se realiza el diseño óptico de instrumentación astronómica en el rango espectral visible e infrarrojo (imagen, espectroscopía, fotometría y polarimetría). En caso necesario, la instrumentación se ensambla, integra y verifica en sala blanca (ISO 8) También pueden llevarse a cabo calibraciones de los distintos componentes de los instrumentos (detectores, lámparas espectrales, alineado de sistemas...). Además, la Udit cuenta con un laboratorio de referencia internacional en polarimetría y ofrece un servicio de ingeniería óptica.

Mecánica

Se desarrollan sistemas criogénicos y de vacío, así como estructuras mecánicas de altas prestaciones para instrumentación espacial y de tierra. La línea de optomecánica incluye todos los aspectos de ingeniería relativos a monturas y soportes de componentes ópticos, así como sistemas posicionadores de alta precisión.

Asimismo, se llevan a cabo análisis estructurales por herramientas de análisis de elementos finitos (FEA), que permiten afrontar de manera integral cualquier problema de mecánica estructural.

Se dispone de un taller de mecánica para la fabricación de piezas con geometrías complejas con excelentes acabados superficiales y definidas por unas estrictas tolerancias dimensionales.

Electrónica

Se desarrollan sistemas electrónicos de control y potencia, incluyendo placas de circuito impreso de alta densidad que, tras su diseño, se fabrican en empresas del sector. Posteriormente, son sometidas a rigurosos test en el IAA-CSIC con el objetivo de obtener la calificación de calidad para vuelos espaciales.

La UDIT cuenta con una amplia experiencia en el desarrollo de sistemas con requerimientos de bajo consumo, redundancia y alta fiabilidad. Se trabaja con circuitos integrados programables de altas prestaciones (FPGA) para aplicaciones complejas: sistemas de control de mecanismos, adquisición, monitorización y procesamiento de datos. Además, se ofrece consultoría de proyectos avanzados de desarrollo hardware y software, tanto para la instrumentación de tierra como para misiones espaciales.

Proyectos internacionales

El desarrollo de instrumentación se enfoca en dos áreas principales: la instrumentación para observatorios terrestres y la embarcada en misiones espaciales. En la primera, la UDIT participa en proyectos tanto para observatorios gestionados por el IAA como los de Sierra Nevada y Calar Alto, como para grandes instalaciones internacionales. Entre los instrumentos más destacados en los observatorios propios se encuentran CARMENES y PANIC, ubicados en Calar Alto. CARMENES está dedicado a la búsqueda de exoplanetas terrestres, mientras que PANIC se centra en la observación de gran campo. Actualmente, se está desarrollando TARSIS, un espectrógrafo de última generación para la observación de cúmulos de galaxias. En cuanto a los proyectos para grandes instalaciones internacionales, la UDIT ha contribuido al desarrollo de instrumentación para el Gran Telescopio Canarias (Observatorio del Roque de los Muchachos), como MEGARA, un multispectrógrafo que estudia, con un detalle sin precedentes, la composición química y la dinámica de las galaxias a lo largo de diferentes épocas del universo. Además, la UDIT participa en grandes proyectos como MOSAIC y ANDES, ambos instrumentos para el Telescopio Extremadamente Grande (ELT) del Observatorio Europeo Austral (ESO), en Chile.

1981

Nuestra aventura espacial se inició el 19 de diciembre de 1981 con el lanzamiento desde el Arenosillo de dos cohetes de sondeo para el estudio de las emisiones infrarrojas en la atmósfera terrestre

COMÁS SOLÁ HASI



Misión de prueba del instrumento HASI.

CASSINI -HUYGENS



Misión con destino a Saturno y su mayor luna, Titán.

(NASA/ESA)

SABER



Instrumento a bordo del satélite TIMED.

(NASA)

ROSETTA



Misión con destino al cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko.

(ESA)

Hinode



Satélite para el estudio del Sol.

CoRoT



Misión para el estudio de la variabilidad estelar y la búsqueda de planetas extrasolares.

EL IAA EN EL ESPACIO

- 1975-2025

1995

1996

1997

2001

2003

2004

2005

2006

2009

2013

MARS 96



Misión con destino a Marte (lanzamiento fallido).

(NPO Lavochkin)

MARS EXPRESS



Misión con destino a Marte.

(ESA)

MIPAS



Instrumento a bordo del satélite ENVISAT.

(ESA)

VENUS EXPRESS



Misión con destino a Venus.

(ESA)

SUNRISE I



Misión estratosférica para el estudio del magnetismo solar.

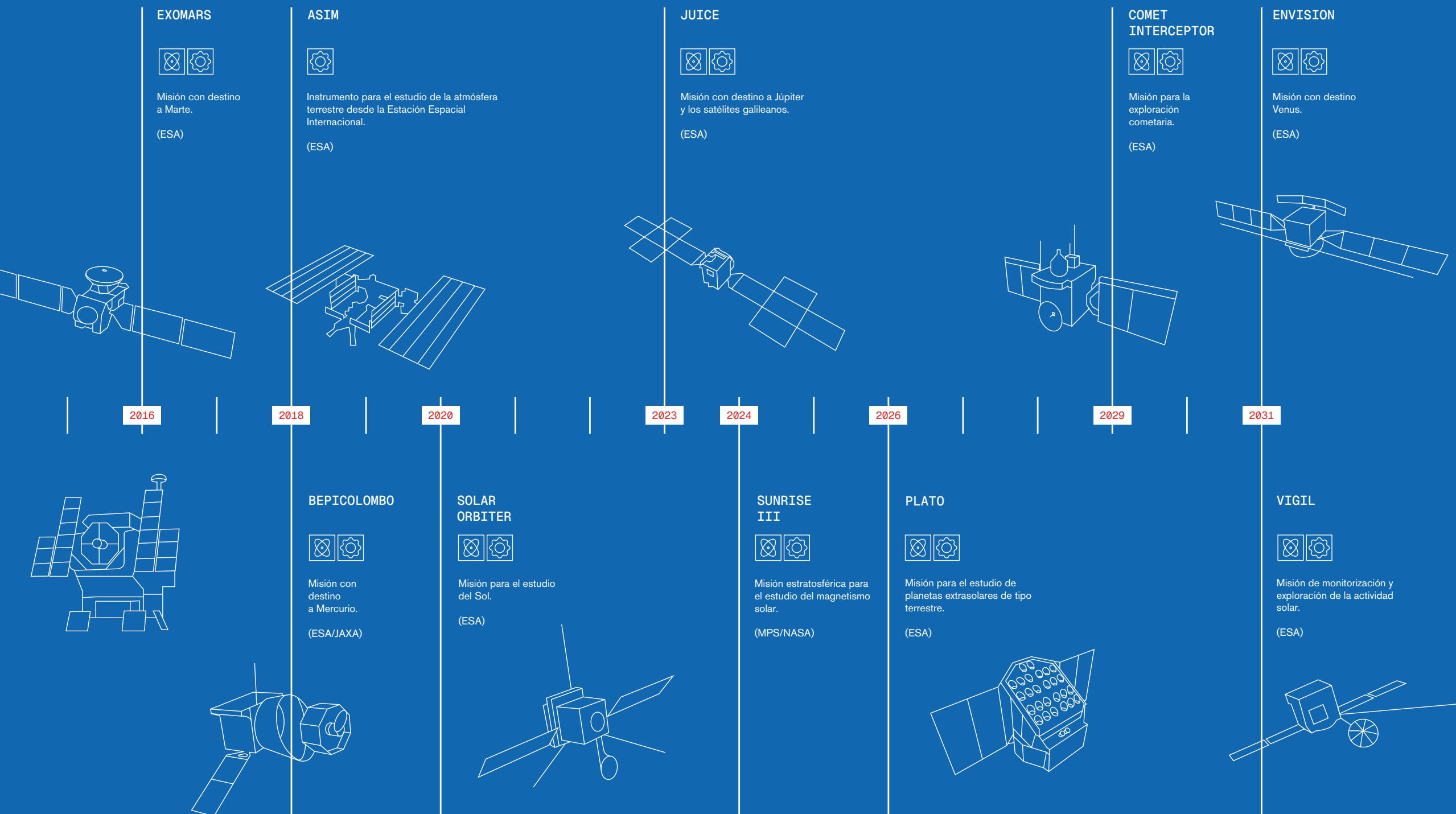
(MPS/NASA)

SUNRISE II



Misión estratosférica para el estudio del magnetismo solar.

(MPS/NASA)



PARTICIPACIÓN
CIENTÍFICA



PARTICIPACIÓN
TECNOLÓGICA

OBSERVATORIOS SIERRA NEVADA Y CALAR ALTO

La astrofísica actual se desarrolla gracias a un conjunto de telescopios y detectores repartidos por todo el planeta y, en algunos casos, más allá de la atmósfera terrestre. Estos recursos, a los que se accede en muchos casos de forma competitiva, permiten la observación del cielo en diferentes longitudes de onda, desde la luz más fría hasta las altas energías.

El IAA-CSIC gestiona científicamente dos observatorios ópticos: el Observatorio de Sierra Nevada y el Observatorio de Calar Alto, en Almería. El Observatorio de Sierra Nevada (OSN) es un observatorio de alta montaña situado en el paraje de la Loma de Dílar, dentro de la estación de esquí de Sierra Nevada, en Granada. Es operado, desarrollado y gestionado íntegramente por el IAA-CSIC. Por su parte, el Observatorio de Calar Alto se encuentra en la Sierra de Los Filabres, al norte de Almería, y es gestionado conjuntamente con la Junta de Andalucía.



EL OBSERVATORIO DE SIERRA NEVADA (OSN)

Un laboratorio de altura

Pablo Santos Sanz

La atmósfera situada sobre las cumbres de Sierra Nevada goza de unas características extraordinarias para las observaciones nocturnas. La pureza y estabilidad de los cielos visibles desde estas montañas permiten obtener datos astronómicos únicos y de gran calidad.

Además, el bajo contenido de vapor de agua en la atmósfera de Sierra Nevada facilita el paso de gran parte de las radiaciones infrarrojas y milimétricas, que normalmente quedan retenidas. Esto hace de sus cumbres un lugar excepcional para la obtención de datos en estas longitudes de onda. Sumado a la gran cantidad de noches despejadas, Sierra Nevada se configura como un enclave único para la observación astronómica, comparable a muy pocos lugares sobre la superficie de la Tierra.

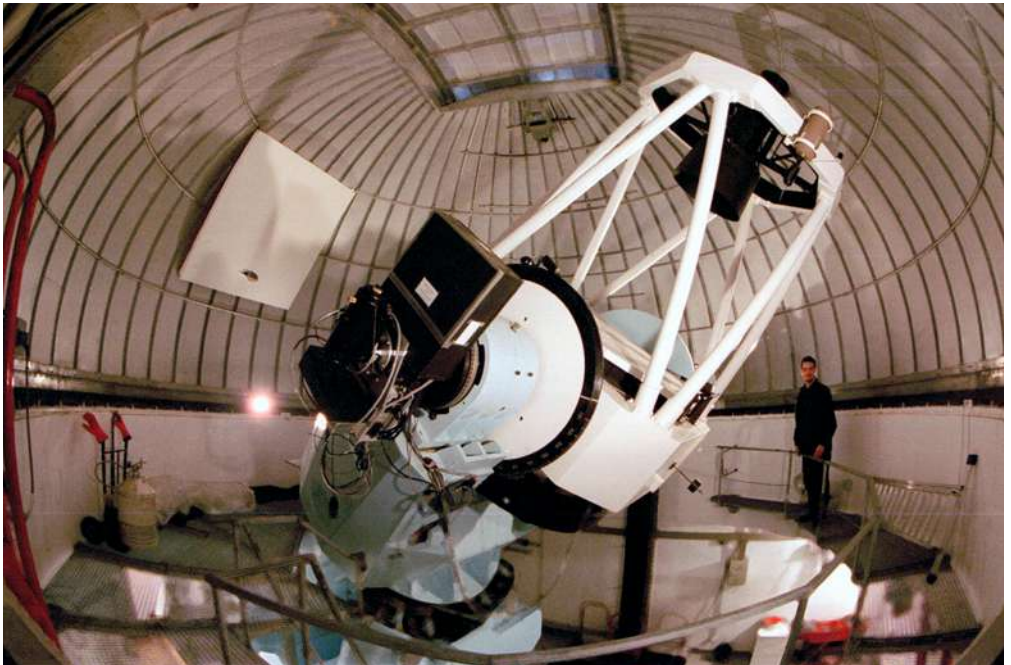
La historia del Observatorio de Sierra Nevada (OSN) se remonta a 1965, cuando comenzó la construcción del Observatorio del Mojón del Trigo, a 2605 metros de altitud. Trece años después se iniciaron las obras de la actual instalación del OSN, ubicado en la Loma de Dílar, dentro del Parque Nacional de Sierra Nevada. Su inauguración oficial tuvo lugar en 1981. En esa época, el observatorio operaba con dos telescopios: uno de 60 centímetros de diámetro, procedente del Observatorio de Niza, y otro de 75 centímetros, perteneciente al Observatorio de Greenwich. Sin embargo, en 1992 estos equipos fueron reemplazados por dos nuevos telescopios de mayor capacidad, de 1.5 y 0.9 metros de diámetro, inaugurados oficialmente en 1993.

En la actualidad, el OSN, perteneciente al Instituto de Astrofísica de Andalucía, alberga varios telescopios adicionales de menor diámetro y una amplia variedad de instrumentación científica. Entre sus múltiples funciones, destacan la detección de meteoros y bólidos en la atmósfera terrestre, la medición de la contaminación lumínica y la evaluación de la calidad del cielo en su entorno. Además, el observatorio contribuye al estudio de la mesopausa, una región clave de la atmósfera situada a unos 90 kilómetros de altitud.

Con sus 2896 metros sobre el nivel del mar, el OSN se erige como la instalación astronómica permanente más alta de Europa. Un enclave privilegiado desde el que se llevan a cabo investigaciones astrofísicas punteras lideradas por el personal investigador del IAA, así como por otras instituciones nacionales e internacionales.



Observatorio de Sierra
Nevada.
Crédito: IAA-CSIC



OBSERVATORIO DE CALAR ALTO (CAHA)

El mayor observatorio de Europa continental

Jesús Aceituno y Gilles Bergond

El Observatorio de Calar Alto está situado en la sierra de los Filabres (Almería). Hasta 2018 fue operado conjuntamente por el Instituto Max-Planck de Astronomía (MPIA-MPG), en Heidelberg (Alemania), y el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) en Granada. En 2019 se incorpora al complejo científico la Junta de Andalucía, en sustitución del socio alemán, y el nombre oficial del observatorio pasa a ser el Centro Astronómico Hispano en Andalucía (CAHA).

Calar Alto constituye la instalación astronómica más relevante en suelo continental europeo, y ha supuesto desde 1975 uno de los pilares del avance de la astronomía española y alemana. Se trata de una de las Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares (ICTS) que cuenta con telescopios de 3.5 y de 2.2 metros de apertura (además, el observatorio alberga otros dos telescopios de 1.23 y 0.8 metros). La continua renovación de los instrumentos que se acoplan a los telescopios mantiene a Calar Alto en la vanguardia de la astronomía actual; la ingeniería, la ciencia y la empresa españolas participan también en estos desarrollos.

La calidad natural intrínseca del cielo nocturno en Calar Alto hace de este lugar el mejor en Europa continental para la observación astronómica, con alrededor de un 70 % del tiempo útil para la observación.

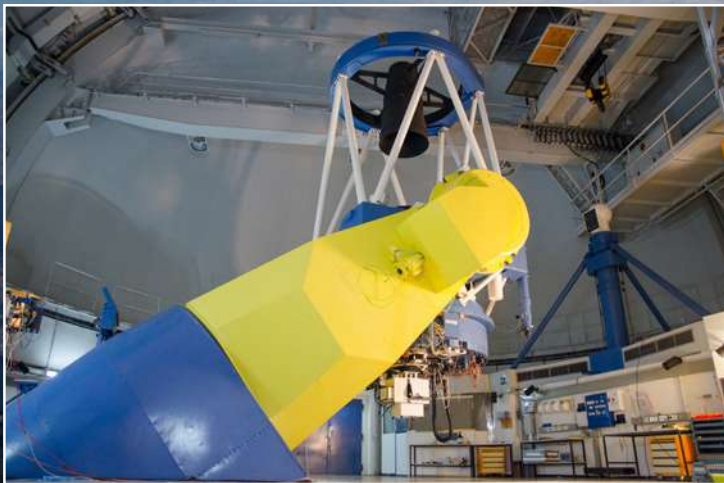
Los estudios desarrollados en el observatorio abarcan desde el entorno más cercano, el Sistema Solar, hasta los confines del universo observable. Dado el carácter interdisciplinar y colaborativo de la astrofísica moderna, muchos de estos proyectos implican observaciones de apoyo para misiones espaciales y, en este ámbito, desde Calar Alto se ha contribuido con datos adicionales a las investigaciones efectuadas con los satélites CoRoT, Herschel, Deep Impact, Gaia, Rosetta o el Telescopio Espacial James Webb (JWST), entre otros.

Calar Alto es uno de los observatorios más productivos en cuanto a artículos científicos publicados en revistas internacionales con sistema independiente de revisión por pares.

Una parte del tiempo de observación se dedica a proyectos especiales, que se desarrollan a largo plazo y que cuentan con acceso garantizado a los telescopios e instrumentos durante varios años. En este ámbito destacó hasta el año 2010 el sondeo cosmológico ALHAMBRA, orientado al análisis de las propiedades del universo desde el entorno cercano hasta grandes distancias. Posteriormente se completó el sondeo CALIFA, un proyecto de legado que aplicó la técnica de la espectroscopía de campo integral a medio millar de galaxias seleccionadas del universo local, lo que ofrece información inédita sobre la estructura, evolución e historia de la formación de estrellas en estos grandes sistemas estelares, parecidos y a la vez diferentes a nuestra propia galaxia.

Actualmente están en curso las observaciones para el proyecto de vanguardia CARMENES, centrado en la investigación sobre planetas habitables en el universo. Más de sesenta exoplanetas se han descubierto gracias a este instrumento. Los nuevos proyectos de telescopio modular (MARCOT) e instrumentales (TARSIS) están en desarrollo y aseguran el futuro del observatorio después de cincuenta años de su historia común con el IAA.





Observatorio de Calar Alto.
Crédito: CAHA



UN VIAJE DE HISTORIAS

Emilio José García Gómez-Caro

A veces, las cosas cristalizan de la forma más insospechada. En el caso de la divulgación en el IAA, podríamos decir que todo comenzó con un viaje.

En 1992, los investigadores Emilio Alfaro y Chema Torrelles disfrutaban de una estancia sabática en la ciudad de Boston. Allí fueron testigos de una actividad que el Departamento de Astronomía organizaba mensualmente: una charla abierta a la ciudadanía, seguida de una observación del cielo con un pequeño telescopio instalado en la azotea. Una locura, vaya.

A su regreso, y junto con el también investigador Antxon Alberdi, propusieron una iniciativa similar, que con el tiempo llevó incluso a la instalación de un pequeño telescopio en la azotea del IAA. Aunque no fue fácil. Tardaron algunos años en superar cierta resistencia institucional (por aquel entonces, que un centro de investigación dedicara tiempo a la divulgación no estaba precisamente bien visto). Pero finalmente, y gracias al apoyo del por entonces director Rafael Rodrigo, en mayo de 1996 se impartió la primera charla de divulgación en el IAA dirigida a la ciudadanía de Granada. La ofreció Emilio Alfaro bajo el título *Galaxias: ladrillos del universo*. Y no debió de ser un ladrillo precisamente, porque, veintinueve años después, este ciclo de charlas sigue fiel a su cita el último jueves de cada mes, ahora bajo el nombre *Charlas Lucas Lara*, en honor a un compañero fallecido en plena carrera profesional y muy activo en divulgación. Además, al tiempo comenzó una colaboración con el periódico local, el IDEAL de Granada. Todas las semanas se publicaba en sus páginas un artículo de divulgación y se anunciaba la charla de la próxima semana (era lo más parecido a anunciarse en redes sociales de aquella época).

En el año 2000 cristalizó otra idea, igual de aventurada para la época: la publicación de una revista trimestral de divulgación compuesta por reportajes y noticias basadas en nuestra investigación. Con Antxon Alberdi como director y una edición inicialmente de lo más casera, nació la *Revista IAA: Información y Actualidad Astronómica* (fíjense en lo bien hilado del acrónimo). Y lo nuestro con la divulgación debe de ser pura cabezonería, porque la revista sigue viva veinticinco años después y acumula ya más de setenta y cinco números.

Hay que tener en cuenta que, en aquellos años, la comunicación científica —especialmente la procedente de centros de investigación— era una *rara avis*. Las unidades de cultura científica no existían. Aquel año, el IAA tomó una decisión, vista con perspectiva, de lo más audaz y precursora: contratar a una periodista científica. Ahí es nada.

En 2002, Silbia López de Lacalle (coautora de este libro) se incorporó al IAA para elaborar un suplemento sobre astrofísica que aparecería en el diario IDEAL, una iniciativa pionera que introducía la ciencia en un periódico generalista y que obtuvo el Premio Prisma al mejor texto periodístico de los Museos Científicos Coruñeses. Aquello marcó el inicio de una trayectoria multidisciplinar en comunicación científica que el IAA ha desarrollado a lo largo de más de veinte años, explorando prácticamente todos los lenguajes y formatos posibles.

Vamos, que desde entonces no hemos parado.

Hemos viajado por el cosmos durante cincuenta y dos semanas; fuimos pioneros en el podcast científico; controlamos un extraño aparato radiofónico capaz de hacer cosas extraordinarias; tenemos nuestra propia serie de televisión; hemos dirigido documentales, diseñado videojuegos y producido exposiciones y eventos de todo tipo. Dimos voz a la primera divulgadora folclórica de este país, un astrónomo diletante nos sacó de quicio y, para nuestra sorpresa, descubrimos que Tesla y Henrietta Leavitt fueron *youtubers* en sus ratos libres.

Hemos contado la astrofísica con teatro, monólogos, cómic, dibujos animados, marionetas y máscaras; la hemos cocinado, cantado, bailado, recitado e incluso improvisado. Desplegamos un trocito de Sol en un paseo granadino, hicimos impactar un meteorito musical en pleno centro de la ciudad, empapelamos las calles de planetas y nos hemos colado de manera permanente en la Feria del Libro de Granada.

En los tiempos duros nos entregamos a la divulgación de guerrilla y nos pusimos en carretera por los pueblos de la comarca, como si de unas nuevas misiones pedagógicas «científicas» se trataran. Nos han visitado miles de colegios e institutos, y hemos iniciado en la investigación a centenares de estudiantes. Seguimos luchando por hacer la ciencia más accesible y universal, y por visibilizar el papel de la mujer y la diversidad en la investigación. Y, por supuesto, hemos difundido nuestra ciencia en centenares de notas de prensa y miles de apariciones en medios, hasta el punto de que la comunicación y la divulgación han dejado de ser esa *rara avis* para convertirse en parte esencial de nuestra actividad cotidiana como centro.

Treinta y tres años después, miles de actividades de divulgación y unos cuantos premios más tarde, somos tres personas trabajando en comunicación a tiempo completo y muchos investigadores e investigadoras participando, e, incluso, liderando actividades exclusivamente de divulgación.

La verdad es que aquel viaje a Boston fue solo el comienzo de una aventura que nunca imaginamos que llegaría tan lejos. O tal vez sí.

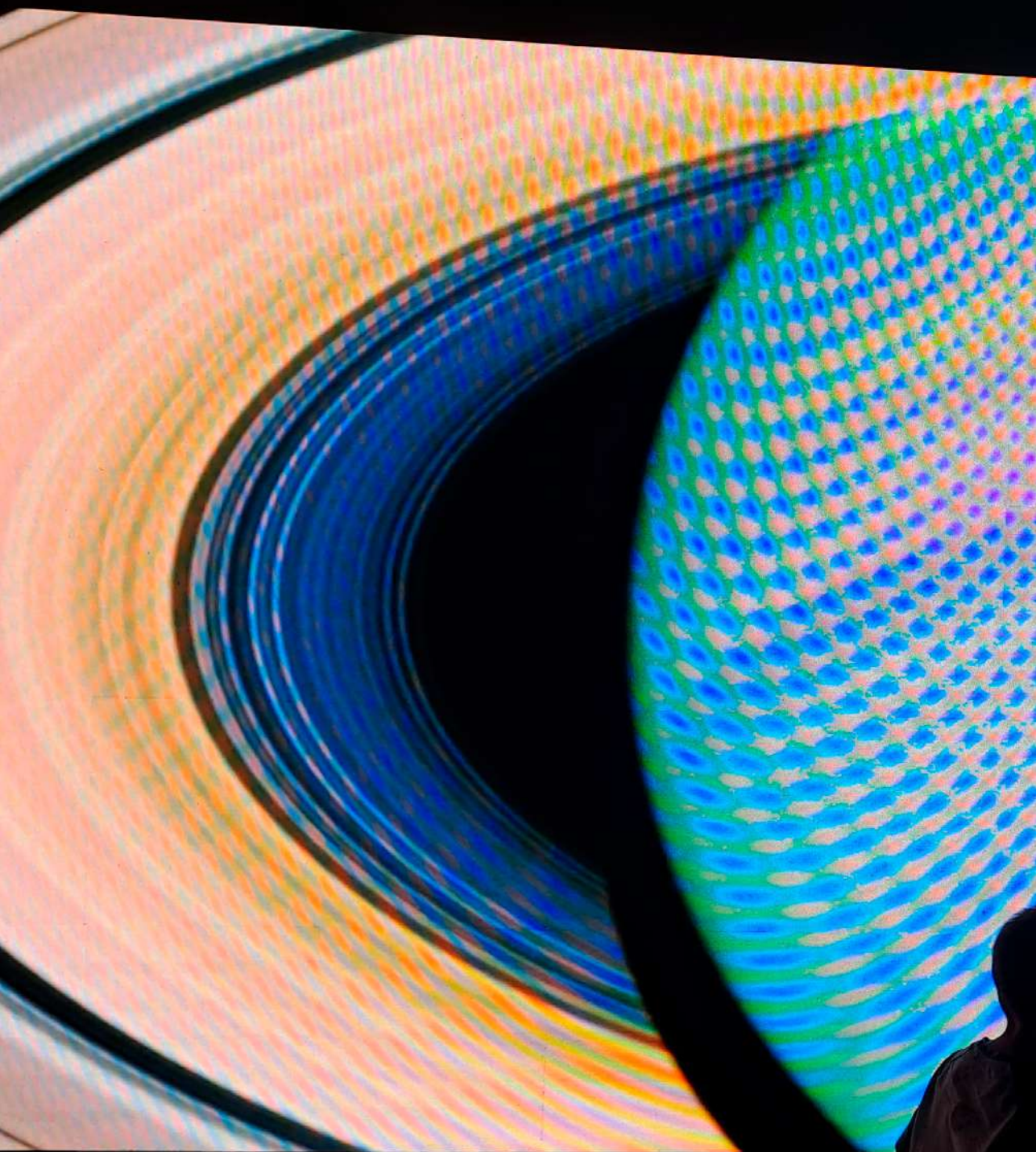


Imagen de Astrosound II.
Crédito: IAA-CSIC



EL IAA-CSIC, CENTRO DE EXCELENCIA SEVERO OCHOA

Isabel Márquez Pérez

El IAA obtuvo en 2018 el distintivo Severo Ochoa, otorgado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Este reconocimiento se concede mediante un proceso de competencia competitiva y selección por un prestigioso jurado internacional a aquellos centros que cuentan con «programas de investigación de frontera y altamente competitivos, y que se encuentran entre los mejores del mundo en sus respectivas áreas científicas». El distintivo reconocía la excelencia del IAA, que en ese momento contaba con más de cuarenta años de andadura. El IAA destaca a nivel nacional e internacional por cubrir múltiples campos de la astrofísica y ciencias del espacio, participando en observaciones multirrango tanto desde Tierra como desde observatorios y misiones espaciales en las que ha realizado desarrollos tecnológicos al más alto nivel.

Conviene recordar que, durante esa primera acreditación, vivimos de lleno los efectos del confinamiento y la pandemia. Fuimos pioneros, por ejemplo, en transformar nuestro programa de coloquios en un recurso *online* disponible para toda la comunidad astronómica internacional. No cabe duda de que el primer Severo Ochoa 2018-2022 supuso un gran salto cualitativo en la vida científico-técnica del centro en muchos aspectos: atrajo talento internacional, incrementó la producción científica, reforzó nuestra participación en proyectos instrumentales internacionales, generó un programa de formación competitivo y consolidó nuestra excelencia internacional. Un gran logro, posible gracias al esfuerzo, compromiso, ilusión y trabajo en equipo del personal científico, tecnológico y administrativo del IAA. Un viaje de cuatro años y medio en el que cumplimos nuestro objetivo final: terminar con un nuevo comienzo!

En diciembre de 2022, el IAA ya estaba seleccionado para su segunda acreditación Severo Ochoa, una excelente noticia y un gran reconocimiento para nuestro centro, que nos posiciona para ser más ambiciosos en la excelencia científico-técnica. Este nuevo Plan Estratégico prioriza las actividades científicas y tecnológicas en tres líneas estratégicas: a) Sistemas pla-

netarios, atmósferas e interacciones estrella-planeta; b) Acreción, formación estelar y entorno como motores de la evolución de las galaxias; c) Instrumentación e instalaciones astronómicas de última generación. Reforzamos nuestro liderazgo internacional apoyando estas tres líneas estratégicas mediante la contratación de personal con talento, fomentando las sinergias e interacciones entre los grupos del IAA y con grupos externos de otros institutos de investigación punteros, y complementando la financiación para el desarrollo instrumental y tecnológico. Las actividades de fertilización cruzada dentro de las tres líneas estratégicas son fundamentales. Consolidamos y ampliamos tanto los programas de formación y género como nuestro compromiso con la Ciencia Abierta y los principios FAIR. Hacemos hincapié en la formación del personal más joven en el contexto de la investigación de alto impacto. Todas las actividades están cuidadosamente diseñadas y planificadas para aprovechar los conocimientos actuales y garantizar el éxito futuro.

El objetivo último del programa de excelencia Severo Ochoa es atraer y alimentar el talento científico, y promover una investigación competitiva internacionalmente, siguiendo los principios de excelencia, integridad, revisión externa por pares y cooperación internacional. En el año en que el IAA cumple su 50.º aniversario, estamos en el ecuador de este nuevo periodo de ilusión y trabajo. Seguimos demostrando día a día nuestra excelencia y nuestra capacidad de liderazgo, para lo cual la aportación de todas y cada una de las personas que forman el instituto es necesaria y bienvenida. Y cuyos logros queremos contar a la ciudadanía, haciéndoles partícipes de nuestra contribución al conocimiento.



FOTO 01 (arriba izq.)
Celebración del IAA tras obtener el primer distintivo Severo Ochoa en 2018.

FOTO 02 (arriba dcha.)
Celebración del IAA tras la obtención de su segunda acreditación Severo Ochoa en 2022.

FOTO 03 (abajo)
Asamblea General Extraordinaria de la Alianza SOMMa, celebrada en septiembre de 2024 con el apoyo del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, en la que se dio la bienvenida a los centros y unidades de excelencia acreditados. Isabel Márquez recogió la acreditación del IAA, de la Convocatoria de 2021.

PREPARANDO EL FUTURO, CELEBRANDO NUESTRO LEGADO

José Manuel Vílchez Medina

Celebramos cinco décadas de la exploración del cosmos desde el Instituto de Astrofísica de Andalucía; medio siglo de trabajo contribuyendo a expandir el conocimiento en astrofísica. Hemos repasado aquí muchos hitos científicos, proyectos tecnológicos y logros de misiones, muchas tal vez 'imposibles'. Todos ellos son momentos especiales que han forjado el crecimiento de esta institución, y que han dejado nuestra marca en la investigación internacional. Pero este libro no es solo un testimonio de lo logrado por el IAA, sino que nace con la vocación de ser también una puerta abierta al brillante futuro que le queda por recorrer.

El IAA se prepara para afrontar el futuro con una estrategia de investigación ambiciosa, alineada con las grandes preguntas de la astrofísica del siglo XXI, que fomenta la participación en las infraestructuras estratégicas presentes y futuras. En poco tiempo, la generación de telescopios extremadamente grandes, como el Extremely Large Telescope (ELT), revolucionará nuestra capacidad de observar los rincones más lejanos del universo o permitirá caracterizar las atmósferas de exoplanetas con un detalle sin precedentes. Las grandes exploraciones del cielo con telescopios dedicados, como los actuales J-PAS, DESI o, muy pronto, el Vera C. Rubin LSST, producirán grandes censos del universo. Misiones espaciales actualmente en operación, como el James Webb Space Telescope (JWST) o EUCLID, o futuras, como el Nancy Grace Roman Telescope, están revolucionando nuestra visión del cosmos. Asimismo, misiones lideradas por la Agencia Espacial Europea, como PLATO y LISA, permitirán explorarlo con un grado de detalle nunca logrado. Instrumentos en observatorios de escala planetaria, como SKAO, EHT ampliado, EST o CTAO, entre otros, abrirán horizontes nunca antes explorados y generarán enormes volúmenes de datos que van a desafiar la tecnología actual requiriendo, sin duda, el apoyo de la inteligencia artificial (IA).

En el programa de investigación del Instituto de Astrofísica de Andalucía, la IA ha de jugar un papel crucial. La cantidad de datos generados por estas grandes infraestructuras de observación será ingente, inabarcable con las metodologías actuales. Se necesita, por tanto, preparar

nuevas herramientas de análisis, automatización y predicción. En el IAA ya se trabaja en el desarrollo y aplicación de algunas de estas tecnologías, y este debe ser un objetivo *sine qua non* para la consolidación como centro de excelencia y referencia internacional en la investigación astrofísica. Con el apoyo de la IA, no solo será posible procesar toda esta información, sino también, por ejemplo, simular la formación del universo temprano o explorar lo que se esconde tras la tensión cosmológica observada. Permitirá reconstruir el espectro de las primeras galaxias en la reionización, o divisar un nítido horizonte de sucesos. Incluso podremos desarrollar observatorios y astrónomos virtuales capaces de tomar decisiones autónomas sobre la observación, el análisis de datos, plantear nuevas estrategias observacionales, o realizar pruebas en tiempo real. Un nuevo tiempo en la investigación con unos nuevos paradigmas.

Afrontar este futuro prometedor requiere de un plan estratégico a seguir para situar al Instituto de Astrofísica de Andalucía en la vanguardia del conocimiento, abonando el terreno para que las próximas décadas nos deparen descubrimientos trascendentales.

Diseñar una estrategia de éxito para el futuro de un centro de excelencia como el IAA no es fácil. Mirando al desarrollo y crecimiento futuros quizá podríamos extraer algunas pautas sencillas de las enseñanzas de los clásicos —Marco Aurelio, Epicteto, y hasta Gracián, de influencia creciente en ciertas escuelas de negocios—: habría que saber crecer en/para lo esencial, es decir, con un propósito claro, no nos valdría pues la mera acumulación de masa: «crecer sin engordar». Así, el equilibrio en cada momento nos llevaría a la virtud del éxito. Una institución como el IAA debería saber madurar sin anquilosarse, innovar y adaptarse a cada circunstancia cambiante (*panta rei*), siempre manteniendo la esencia, pero sin volverse rígida. Finalmente, habríamos de recordar aquella sabia máxima: «lo que no es bueno para la colmena, no es bueno para la abeja».

Estudiar las primeras estrellas de las primeras galaxias, casi pasear las lunas de Júpiter, medir la atmósfera de exoplanetas, divisar el límite mismo de agujeros negros masivos o medir ondas gravitacionales de los eventos más extremos del cosmos, son solo algunos ejemplos de los retos que el IAA tiene planteados. Sin duda se abre un tiempo fascinante para la investigación astrofísica, especialmente para los jóvenes investigadores en el IAA, en Granada (¡me sentiría afortunado si hoy comenzase mi tesis doctoral!).

Dicen que Lorca creía que «de Granada solo se sale por el cielo». Y es que este ha sido siempre un lugar especial para admirar el firmamento; quizá por esa mole imponente de Sierra Nevada, que tanto impresionó a Sorolla, o por su cercanía a las altas cumbres del oriente andaluz, sus observatorios naturales. Fue esta la ciudad heredera del legado del conocimiento astronómico andalusí, cuando Europa aún despertaba al Renacimiento. Los andalusíes desarrollaron instrumentos de precisión, perfeccionaron tablas astronómicas y tradujeron el saber clásico, preservando y ampliando lo recibido de culturas anteriores. El reino nazarí fue el último bastión que conservó y enriqueció todo aquel conocimiento del cosmos. Curiosamente, de entre las ciudades de Al-Ándalus, Granada fue la única donde la astrofísica novecentista española arraigó con fuerza a principios del siglo pasado, dando lugar a la creación del Observatorio de Cartuja. También en Granada, hace medio siglo, nació el IAA, del que hoy celebramos su legado, los logros conseguidos y su vibrante presente, siempre mirando hacia el futuro.

Granada, 2025



En 1975, la astrofísica española era poco más que una anécdota. Gracias al esfuerzo, la constancia y la pasión de un grupo de pioneros y pioneras, nació el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), con la ambiciosa intención de crear un centro de excelencia en investigación y desarrollo en astrofísica y exploración espacial.

Cincuenta años después, España es una de las potencias mundiales en el campo de las ciencias del espacio, y el IAA-CSIC ha contribuido de forma decisiva a ello. Este libro, concebido con motivo de su cincuenta aniversario, pretende un triple objetivo: rendir homenaje y dejar testimonio de nuestro pasado, proyectar nuestra historia hacia las futuras generaciones de astrónomos y astrónomas y, sobre todo, relatar la extraordinaria aventura científica y humana de un centro que, desde un rincón de la ciudad de Granada, lleva medio siglo mirando las estrellas.



INSTITUTO DE
ASTROFÍSICA DE
ANDALUCÍA



EXCELENCIA
SEVERO
OCHOA



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

EDITORIAL
CSIC

ISBN: 978-84-00-11412-1



9 788400 114121