

69

FEBRERO DE 2023  
revista.iaa.es

# IAA

Información y actualidad astronómica

Revista de divulgación del Instituto de Astrofísica de Andalucía



## Misión JUICE. Hacia Júpiter y sus lunas heladas



INSTITUTO DE  
ASTROFÍSICA DE  
ANDALUCÍA



EXCELENCIA  
SEVERO  
OCHOA



CSIC

Concepción artística de JUICE (ESA).

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

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

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

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

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

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

# SUMARIO

Misión JUICE ...	3
CTAO: el futuro de la astrofísica a altas energías ...	8
Deconstrucción. Las mujeres de la Luna ...	12
El Moby Dick de ... Alicia Pelegrina (IAA-CSIC) ...	14
Historias ... Carmen Morales Durán ...	15
Actualidad ...	16
Pilares e Incertidumbres ... La formación de galaxias ...	22



Imagen: Luis Saracho Martínez.

## Comienza la construcción de TARSIS, el instrumento de próxima generación para el telescopio de 3.5 metros de Calar Alto

El nombre TARSIS, acrónimo del inglés *Tetra-ARmed Super-lfu Spectrograph*, alude a su diseño óptico basado en cuatro brazos, tres de ellos sensibles a longitudes de onda azules y uno sensible a longitudes de onda rojas. La combinación de un amplio campo de visión (3x3 minutos de arco) y una alta sensibilidad desde el ultravioleta (en el rango conocido como rayos UV-A) hasta longitudes de onda

rojas harán de TARSIS un instrumento único. El diseño de TARSIS y la exquisita transparencia del cielo de Calar Alto permitirán observar en el rango completo de UV-A, un dominio casi inexplorado desde Tierra.

Una vez concluido el desarrollo, TARSIS pasará a formar parte de la instrumentación disponible en el telescopio de 3.5 metros de Calar Alto. Sin embargo, durante los primeros años de

observaciones TARSIS estará dedicado mayormente al proyecto CATARSIS, que estudiará una muestra de dieciséis cúmulos de galaxias lejanos y permitirá alumbrar etapas anteriores del universo: se trata de galaxias entre un 20% y un 25% menos masivas que las actuales, pero que, en su camino a convertirse en las galaxias que vemos hoy, formaban estrellas a un ritmo tres veces superior al presente. Las obser-

vaciones de CATARSIS permitirán validar el modelo cosmológico estándar y comprender la naturaleza de la materia y energía oscuras, así como la relación entre la evolución de las galaxias y su entorno. "Alcanzar este hito será posible gracias al inteligente diseño de TARSIS unido a las características del telescopio de 3.5 metros de Calar Alto, una combinación óptima para desarrollar la ciencia del proyecto CATARSIS", indica José Manuel Vilchez, profesor de investigación del CSIC y representante del Instituto de Astrofísica de Andalucía en el consorcio de construcción de TARSIS.

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

## JUICE: explorando Júpiter y sus lunas heladas como nunca

**LA MISIÓN JUICE (JUPITER ICY MOONS EXPLORER), DE LA AGENCIA ESPACIAL EUROPEA (ESA), TIENE PREVISTO SU LANZAMIENTO EN EL MES DE ABRIL Y TARDARÁ UNOS OCHO AÑOS EN ALCANZAR EL GIGANTE GASEOSO**

Celia Navas (IAA-CSIC)

**JÚPITER ES EL MÁS GRANDE DE TODOS LOS PLANETAS DEL SISTEMA SOLAR,** con sus 70.000

kilómetros de diámetro y una masa superior a la suma de la del resto de planetas, y se encuentra situado a una distancia cinco veces mayor a la que separa la Tierra del Sol.

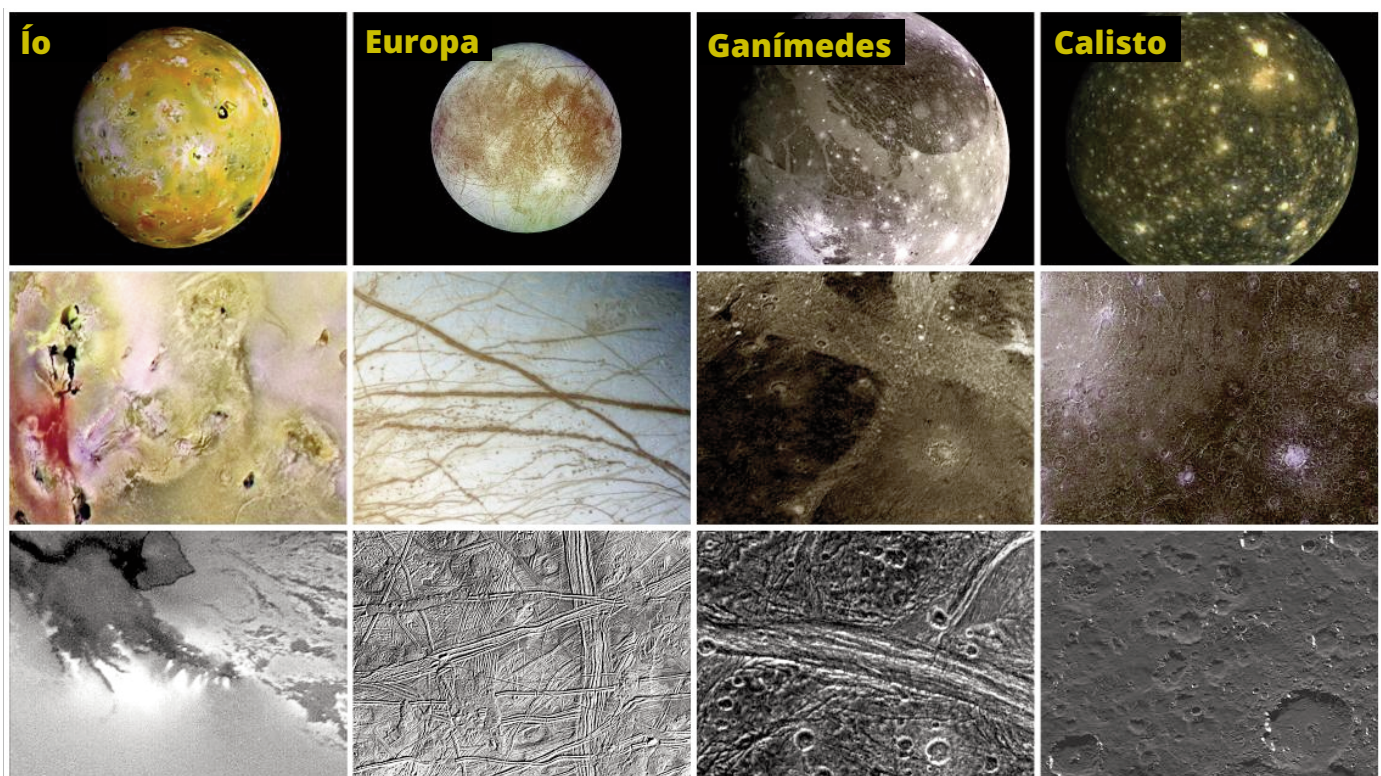
Se trata de un planeta gaseoso, compuesto principalmente de helio e hidrógeno, sin superficie sólida, cuya atmósfera ocupa una gran parte de su volumen total. Además, posee una magnetosfera extensa formada por un campo magnético de gran intensidad. De hecho, después del campo magnético del Sol, el campo magnético de este planeta es la estructura de mayor tamaño en todo Sistema Solar.

El sistema joviano se compara a menudo con un Sistema Solar en miniatura. En 1979, la misión *Voyager 1* descubrió que el planeta se encuentra rodeado por un importante sistema de anillos y gran cantidad de satélites (ochenta registrados hasta la fecha). De estos, destacan por

su tamaño las cuatro lunas galileanas: Ío, Europa, Ganímedes y Calisto, descubiertas en 1610 por Galileo Galilei.

Ío es el objeto con mayor actividad volcánica de todo el Sistema Solar y se cree que, bajo la superficie de los otros tres - Europa, Ganímedes y Calisto-, pueden hallarse océanos de agua salada. La presencia de agua líquida es una característica imprescindible para que un cuerpo sea candidato a albergar vida, algo que, de momento, solo se ha hallado en un lugar en el universo: la Tierra.

La superficie de Europa está compuesta en su mayor parte por hielo de agua y hay indicios de que podría estar cubriendo un océano de agua o hielo en suspensión. Se cree que Europa posee el doble de agua que nuestro planeta. Esta luna es de gran interés por su potencial para tener una zona habitable en la subsuperficie, ya que en la Tierra se han encontrado formas de vida cerca de vol-



Crédito: NASA.

canes subterráneos y en otros lugares extremos que pueden ser análogos a lo que podría existir allí.

Ganímedes, por su parte, es el satélite de mayor tamaño del Sistema Solar, mayor incluso que Plutón y Mercurio, y es la única luna de nuestro sistema que genera su propio campo magnético. Presenta una amplia gama de características superficiales con edades muy diferentes, ofreciendo un registro geológico que abarca varios miles de millones de años. Tiene un océano subsuperficial y una relación compleja con el entorno alrededor de su planeta progenitor (el campo magnético intrínseco de Ganímedes ha generado una magnetosfera dentro de la mayor de Júpiter, con la que interactúa).

Por último, Calisto posee una superficie muy antigua, plagada de cráteres, que no parece haber estado geológicamente activa desde hace unos mil millones de años. Este satélite parece tener un campo magnético que no se genera internamente, como el de Ganímedes, sino que se produce o bien por un gran depósito de líquido que se esconde bajo su cubierta helada, o bien debido a interacciones en su atmósfera superior ionizada. Es el satélite galileano menos evolucionado geológicamente y, por ello, su estudio puede revelar información única sobre su formación inicial y sobre el origen del sistema de Júpiter.

Estos tres satélites conforman las llamadas lunas heladas de Júpiter, que, junto al planeta en sí, son los objetivos principales de la nueva misión JUICE de la Agencia Espacial Europea.

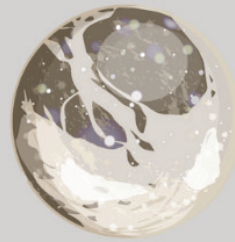
### LA MISIÓN JUICE

JUICE (*JU*pter *I*cy *M*oons *E*xplorer), el Explorador de las Lunas de Hielo de Júpiter, fue seleccionado en 2012 como la primera misión a gran escala del programa *Cosmic Vision 2015-2025* de la ESA, que se basa en cuatro temas clave: ¿cuáles son las condiciones para la formación de planetas y la aparición de la vida?, ¿cómo funciona el Sistema Solar?, ¿cuáles son las leyes físicas fundamentales del universo? y ¿cómo se originó el universo y de qué está hecho? Esta misión busca dar algunas respuestas a las dos primeras preguntas.

JUICE estudiará la aparición de mundos habitables alrededor de gigantes gaseosos y utilizará el sistema de Júpiter como arquetipo de los numerosos planetas gigantes que ahora se sabe que orbi-

# OBJETIVOS CIENTÍFICOS DE LA MISIÓN

## EXPLORAR LA ZONA HABITABLE: GANÍMEDES, EUROPA Y CALISTO



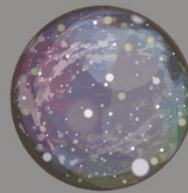
### GANÍMEDES COMO OBJETO PLANETARIO Y POSIBLE HÁBITAT

- Caracterizar la extensión del océano y su relación con el interior más profundo
- Caracterizar la capa de hielo
- Determinar la composición global, la distribución y la evolución de los materiales de la superficie
- Comprender la formación de los rasgos de la superficie y buscar actividad en el pasado
- Caracterizar el entorno local y su interacción con la magnetosfera joviana actual



### LAS ZONAS RECIENTEMENTE ACTIVAS DE EUROPA

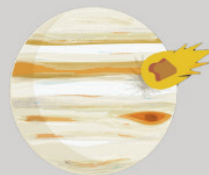
- Determinar la composición del material no helado, especialmente en relación con la habitabilidad.
- Buscar agua líquida en los lugares más activos
- Estudiar los procesos activos recientes



### CALISTO COMO REMANENTE DEL SISTEMA JOVIANO PRIMITIVO

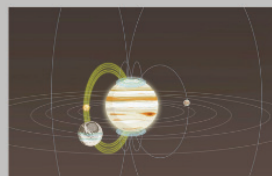
- Caracterizar las capas exteriores, incluido el océano
- Determinar la composición del material no helado
- Estudiar la actividad pasada

## EXPLORAR EL SISTEMA DE JÚPITER COMO ARQUETIPO DE LOS GIGANTES GASEOSOS



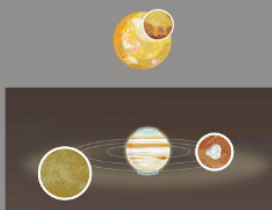
### LA ATMÓSFERA JOVIANA

- Caracterizar la dinámica y la circulación atmosféricas
- Caracterizar la composición y la química atmosféricas
- Caracterizar la estructura vertical atmosférica



### LA MAGNETOSFERA JOVIANA

- Caracterizar la magnetosfera como un rotador magnético rápido
- Caracterizar la magnetosfera como un acelerador gigante
- Comprender las lunas como fuentes y sumideros de plasma magnetosférico



### EL RESTO DE SATÉLITES Y LOS ANILLOS JOVIANOS

- Estudiar la actividad de Io y la composición de su superficie
- Estudiar las principales características de los anillos y satélites pequeños

tan alrededor de otras estrellas. Actualmente, solo se ha hallado vida en la Tierra, pero encontrarla en otras partes del universo ha sido siempre uno de los grandes objetivos de la ciencia espacial.

A fin de investigar las condiciones para la formación de planetas y la aparición de la vida y averiguar cómo funciona el Sistema Solar, la misión explorará la “zona habitable” del gigante gaseoso, caracterizando los océanos, las capas de hielo, la composición, la superficie, el entorno y la actividad de Ganímedes, Europa y Calisto.

Asimismo, en un sentido más amplio, estudiará el sistema de Júpiter, caracterizando su atmósfera, su entorno magnético, su sistema de anillos y otros de sus satélites (incluyendo Ío).

### ITINERARIO DE LA MISIÓN

Esta misión se lanzará en abril de 2023 (la ventana de lanzamiento va desde el día 5 y 25, con primera fecha de intento de lanzamiento el 13 de abril), desde el Puerto Espacial Europeo de Kourou, en la Guayana Francesa, a bordo de un *Ariane 5*, uno de los cohetes de carga pesada más exitosos del mundo. Durante sus casi treinta años de servicio, ha volado, entre muchas otras, misiones como el observatorio espacial de rayos X *XMM-Newton*, la sonda *Rosetta*, los dos satélites de *BepiColombo* o, más recientemente, el telescopio espacial James Webb. JUICE será la última misión de este cohete, que será reemplazado por el *Ariane 6*.

Una vez en el espacio, una serie de sobrevuelos gravitatorios del sistema Tierra-Luna (agosto de 2024), de Venus (agosto de 2025) y de la Tierra (septiembre de 2026, enero de 2029), intercalados por las continuas órbitas alrededor del Sol, pondrán a la nave en ruta hacia Júpiter, al que llegará en julio de 2031. El sobrevuelo de JUICE al sistema Tierra-Luna, conocido como asistencia gravitatoria Luna-Tierra (LEGA), será una primicia mundial ya que, al realizar esta maniobra -un sobrevuelo de la Luna con asistencia gravitatoria seguido tan solo 1,5 días después por otro de la Tierra-, la nave podrá ahorrar una cantidad significativa de combustible en su viaje.

JUICE iniciará su misión científica unos seis meses antes de entrar en órbita alrededor de Júpiter, realizando observaciones a medida que se acerca a su des-

tino. Entre julio de 2031 y noviembre de 2034 realizará treinta y cinco sobrevuelos de las lunas heladas (dos de Europa, doce de Ganímedes y veintiuno de Calisto). En total, durante su estancia en la órbita de Júpiter, pasará cuatro años realizando observaciones detalladas de Júpiter, Ganímedes, Calisto y Europa. En diciembre de 2034 entrará en órbita alrededor de Ganímedes, convirtiéndose en la primera nave espacial en orbitar la luna de otro planeta. Con el tiempo, la órbita de JUICE alrededor de Ganímedes decaerá de forma natural -no habrá suficiente combustible para mantenerla- y se precipitará hacia la superficie de la luna (finales de 2035).

### NAVE E INSTRUMENTOS

JUICE es una misión liderada por la Agencia Espacial Europea (ESA), con participación de la NASA, la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) y la Agencia Espacial de Israel (ISA), y construida por *Airbus Defence and Space*.

La nave transportará diez instrumentos de última generación (nueve dirigidos por socios europeos y uno por la NASA), con los equipamientos de teledetección, geofísica e *in situ* más potentes jamás lanzados al Sistema Solar exterior:

El paquete de teledetección está formado por los instrumentos JANUS -un sistema de cámara óptica-, MAJIS -un espectrómetro de imágenes visibles e infrarrojas-, UVS -un espectrógrafo de imágenes UV- y SWI -un instrumento de ondas

submilimétricas-.

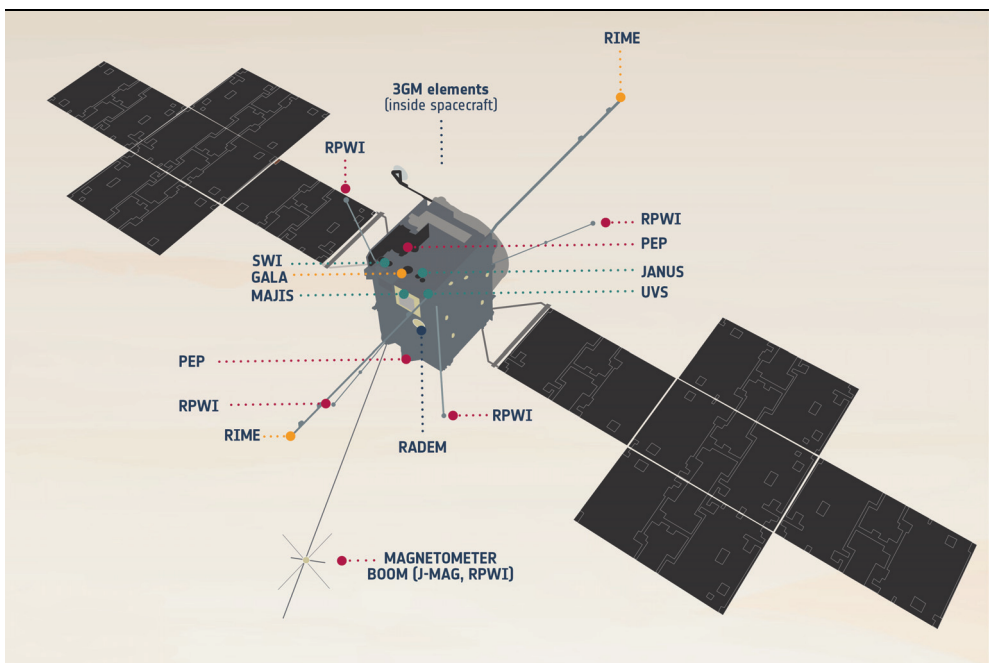
El paquete geofísico incluye un altímetro láser (GALA) y un radar sonda (RIME) para explorar la superficie y el subsuelo de las lunas, y un experimento radiocientífico (3GM) para sondear las atmósferas de Júpiter y sus satélites y medir su campo gravitatorio.

Y el paquete *in situ* contiene un potente conjunto de instrumentos para estudiar el entorno de partículas (PEP), un magnetómetro (J-MAG) y un instrumento de ondas de radio y plasma (RPWI), que incluye sensores de campos eléctricos y magnéticos y cuatro sondas de Langmuir.

JUICE también llevará un experimento llamado PRIDE (*Planetary Radio Interferometer & Dop-pler Experiment*), que realizará mediciones precisas utilizando radiotelescopios terrestres, y un monitor de radiación (RADEM).

La nave operará en un ambiente extremo y ha sido construida para afrontar una gran cantidad de desafíos. El sistema joviano es uno de los ambientes con mayor radiación de todo el Sistema Solar, lo que ha hecho imprescindibles los escudos que protegerán el equipamiento más sensible. Asimismo, deberá ser capaz de afrontar temperaturas hostiles (+250°C durante el sobrevuelo de Venus, -230°C en Júpiter), por lo que se le ha instalado un aislamiento multicapa (MLI), para mantener estable la temperatura interna.

La larga distancia a la que se encontrará también puede suponer dificultades, tanto para la comunicación como para la



carga de energía. Para hacer frente a estos problemas, la nave cuenta con una antena de 2,4 metros para enviar datos a la Tierra -y un potente ordenador de a bordo que resuelve algunos problemas de forma independiente-, y unos paneles solares de 85 metros cuadrados de área para capturar la luz del sol.

### **PARTICIPACIÓN DEL IAA-CSIC**

El Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) ha logrado cultivar durante años un gran prestigio y dilatada experiencia en la construcción de diferentes componentes de la tecnología de las naves espaciales interplanetarias, especialmente en lo que a fuentes de alimentación se refiere. Por ello, los países líderes de diferentes instrumentos espaciales, a la hora de formar los consorcios que diseñarán y construirán el instrumento, eligen el IAA-CSIC como el suministrador de las fuentes de alimenta-

ción.

El IAA-CSIC ha proporcionado fuentes de alimentación para la cámara OSIRIS de la misión *Rosetta* (2004-2015) y del altímetro láser BELA de la misión a Mercurio *BepiColombo* (2018-actualidad) y está produciendo ahora mismo cuatro fuentes para diferentes instrumentos de la misión *Comet Interceptor* (2029) a bordo de las naves europeas de la misión.

En el caso de JUICE, forma parte de los consorcios internacionales que han construido dos de los instrumentos: la cámara JANUS (a cargo de la Agencia Espacial Italiana) y el altímetro láser GALA (a cargo de la Agencia Espacial Alemana).

Además, para JANUS, ha desarrollado la electrónica de control y ha diseñado y fabricado, en colaboración con la empresa SENER Aeroespacial, la rueda de filtros, una pieza de apenas 724 gra-

mos y 142 milímetros de diámetro que alberga trece filtros científicos, y que supuso un gran reto tecnológico para que la cámara en su totalidad cumpliera con los requerimientos científicos y técnicos impuestos. Las ruedas de filtros de telescopios terrestres son de un tamaño mayor y pueden llegar a pesar decenas de kilos y para la de JANUS se debió realizar un gran trabajo de miniaturización que ahora se está aplicando a futuras misiones espaciales de la ESA.

### **LA EXPLORACIÓN DEL SISTEMA JOVIANO: JUNO, JUICE Y EUROPA CLIPPER**

JUICE se ha construido sobre la base del legado científico y tecnológico de anteriores misiones planetarias y allanará el camino para la futura exploración del Sistema Solar exterior.

En las últimas tres décadas, se han diseñado varias misiones que han tenido



como objetivo este coloso de gas - *Galileo* (1989-2003), *Juno* (2011- actualidad), JUICE (2023) y *Europa Clipper* (2024)-, o que lo han observado en su viaje a sus destinos finales - *Cassini-Huygens* (1997-2017), en su viaje a Saturno, y *New Horizons* (2006-actualidad), en su camino a Plutón-.

JUICE supera las capacidades de misiones anteriores como fueron *Galileo* y *Cassini-Huygens*, y su trabajo complementará directamente los resultados de las misiones *Juno* y *Europa Clipper*, ambas de la NASA.

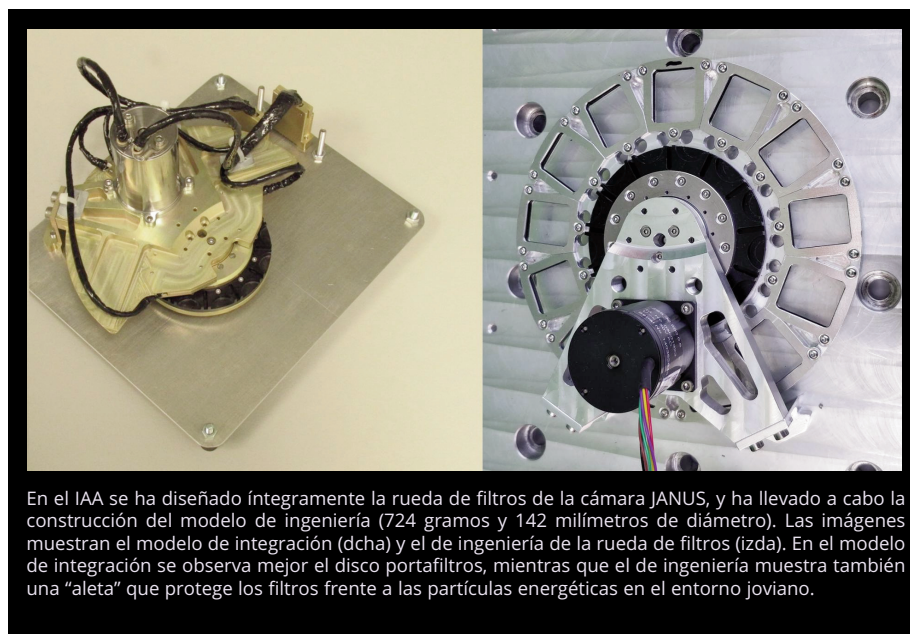
*Juno* se lanzó el 5 de agosto de 2011 y llegó a su objetivo el 4 de julio de 2016, tras un viaje de cinco años y 1700 millones de kilómetros. Su misión consiste en sondear bajo las densas nubes del planeta y responder a preguntas sobre el origen y la evolución de Júpiter, nuestro Sistema Solar y los planetas gigantes en general.

Sus descubrimientos han revolucionado nuestra comprensión del gigante gaseoso y de la formación del Sistema Solar: han cambiado nuestra visión del interior del planeta, su campo magnético interno, su atmósfera (incluidos los ciclones polares, la atmósfera profunda y las auroras) y su magnetosfera.

La misión inicial fue ampliada y actualmente continúa con su investigación, lo que seguirá haciendo hasta septiembre de 2025, o hasta el final de la vida útil de la nave. Hacia el final de la misión principal, cuyo objetivo era el planeta en sí, a medida que la órbita de la nave evolucionaba, los sobrevuelos de la luna Ganímedes iniciaron la transición de *Juno* hacia un explorador completo del sistema joviano y, conforme siga evolucionando su órbita, se planea realizar sobrevuelos de las lunas Europa e Ío.

Aunque *Juno* no coincidirá con JUICE y *Europa Clipper* (ambos estarán aún en su viaje hacia Júpiter cuando este explorador complete su investigación), su trabajo se ha utilizado para preparar mejor ambas misiones: optimizar las estrategias y la planificación de la observación, las prioridades científicas y el diseño de la misión. Básicamente, *Juno* está planteando cuestiones sobre el sistema joviano que JUICE y *Europa Clipper* tratarán de responder.

*Europa Clipper*, como su nombre indica, es una misión centrada en la luna Europa, que busca estudiar el océano que se cree que existe bajo su superficie y determinar si esta luna helada podría tener condiciones adecuadas para la



En el IAA se ha diseñado íntegramente la rueda de filtros de la cámara JANUS, y ha llevado a cabo la construcción del modelo de ingeniería (724 gramos y 142 milímetros de diámetro). Las imágenes muestran el modelo de integración (dcha) y el de ingeniería de la rueda de filtros (izda). En el modelo de integración se observa mejor el disco portafiltros, mientras que el de ingeniería muestra también una "aleta" que protege los filtros frente a las partículas energéticas en el entorno joviano.

vida. JUICE tiene muchos más objetivos: las tres lunas heladas, la atmósfera de Júpiter, la magnetosfera, Ío, otras lunas más pequeñas y los anillos de Júpiter, con un enfoque especial sobre el satélite Ganímedes.

No obstante, que haya dos misiones trabajando simultáneamente en el sistema joviano supone una gran oportunidad para la ciencia y, por ello, los equipos científicos de ambas misiones están trabajando juntos para maximizar sus futuros resultados. Aproximadamente una vez al año se organiza una reunión conjunta y los dos equipos están en contacto regular entre estas reuniones. Además, recientemente se ha creado un grupo directivo dedicado a esta colaboración, que incluye a miembros de ambos grupos.

### RESULTADOS DE LA MISIÓN

Durante el viaje a Júpiter se recogerán algunas imágenes y datos y esta será la primera información disponible de la misión como tal, pero no será hasta unos seis meses antes de la llegada al planeta cuando comenzará la misión científica en sí.

Será en ese momento cuando se tomarán imágenes de Júpiter desde la distancia, que se publicarán poco después. En febrero de 2032 tendrá lugar el primer sobrevuelo científico de una luna joviana (Ganímedes) y la primera aproximación a Júpiter: entonces se tomarán y difundirán las primeras imágenes realmente interesantes. En cuanto a los primeros resultados científicos, aunque no se puede precisar con exactitud, se estima que llegarán en algún momento

de 2032.

¿Y cómo nos llegan estos datos? En 1998, la ESA decidió crear su propia red de seguimiento de sondas del espacio profundo para hacer frente al rápido aumento previsto del número de misiones interplanetarias y, por ello, en la década de los 2000 construyó en Nueva Norcia (Australia) la primera de sus tres Antenas de Espacio Profundo (DSA), de 35 metros de diámetro, a la que siguieron las estaciones de Cebrenos (España) y Malargüe (Argentina). Estas tres estaciones terrestres se encuentran separadas unos 120° en longitud, para proporcionar una cobertura continua mientras la Tierra gira. Son estas estaciones, que se gestionan de forma centralizada desde el Centro Europeo de Operaciones Espaciales (ESOC), situado en Darmstadt, Alemania, las que recibirán los datos de JUICE.

La ESA se encargará de transformar los datos de telemetría directamente de la nave espacial en datos brutos. Posteriormente, los datos brutos serán calibrados por el equipo científico de cada instrumento a bordo de la nave, transformados a formato estándar y se almacenarán en el *Planetary Science Archive* (PSA), alojado en el Centro Europeo de Astronomía Espacial (ESAC) de la ESA, en Villanueva de la Cañada (Madrid, España).

Será en este centro donde se alberguen los datos finales de la misión, que estarán a disposición de todos durante décadas, garantizando así el retorno científico a largo plazo y el apoyo a futuras misiones.

## CTAO: El emocionante futuro de la astrofísica a altas energías

**EL CHERENKOV TELESCOPE ARRAY OBSERVATORY (CTAO), EL PRIMER OBSERVATORIO TERRESTRE DE RAYOS GAMMA, COMENZARÁ SU CONSTRUCCIÓN OFICIAL EN LOS PRÓXIMOS MESES. CON UN RENDIMIENTO TÉCNICO SIN PRECEDENTES Y CON LOS DATOS DISPONIBLES PARA TODA LA COMUNIDAD CIENTÍFICA, ESTE OBSERVATORIO ABRIRÁ LAS PUERTAS A UNA NUEVA CIENCIA A LAS ENERGÍAS MÁS ALTAS. DENTRO DE LA**

**COMUNIDAD CIENTÍFICA ESPAÑOLA E INTERNACIONAL, EL IAA-CSIC JUEGA UN PAPEL CLAVE EN EL DESARROLLO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO DEL CTAO**

Por Alba Fernández-Barral (Responsable de Divulgación, Educación y Comunicación del CTAO), Iván Agudo (Coordinador del grupo del Proyecto CTA en el IAA) y Rubén López-Coto (Coordinador del grupo del Proyecto CTA en el IAA)

La astronomía es una de las ciencias más antiguas. A lo largo de nuestra historia, el ser humano ha tenido la necesidad de mirar al cielo y buscar respuestas a enigmas inalcanzables aquí en la Tierra. Es una necesidad que, afortunadamente, nunca se agota: avanzamos en nuestro entendimiento del cosmos y la física que hay detrás, crecemos así científicamente y socialmente, pero no dejamos nunca de buscar nuevas respuestas. Ahora, en una nueva era tecnológica, seguimos avanzando a través de la observación de lo invisible, los rayos gamma, y de los eventos más energéticos y exóticos. ¿Qué sucede en los chorros de partículas emitidos en la vecindad de un agujero negro supermasivo? ¿Cuál es la naturaleza de la materia oscura? ¿Cómo se aceleran las partículas a sus energías más altas? Para dar respuesta a estas y otras preguntas, estamos preparando el primer observatorio terrestre de rayos gamma del planeta: el *Cherenkov Telescope Array Observatory* (CTAO).

El CTAO, llamado a liderar la astrofísica de altas energías durante las próximas décadas, será el instrumento más grande y sensible para la detección de rayos gamma en un rango energético sin precedentes, desde los veinte gigaelectronvoltios (GeV) hasta los trescientos teraelectronvoltios (TeV), lo que permitirá observar los objetos más lejanos y los aceleradores más extremos del universo. El CTAO estudiará todo el cielo de rayos gamma con más de sesenta teles-

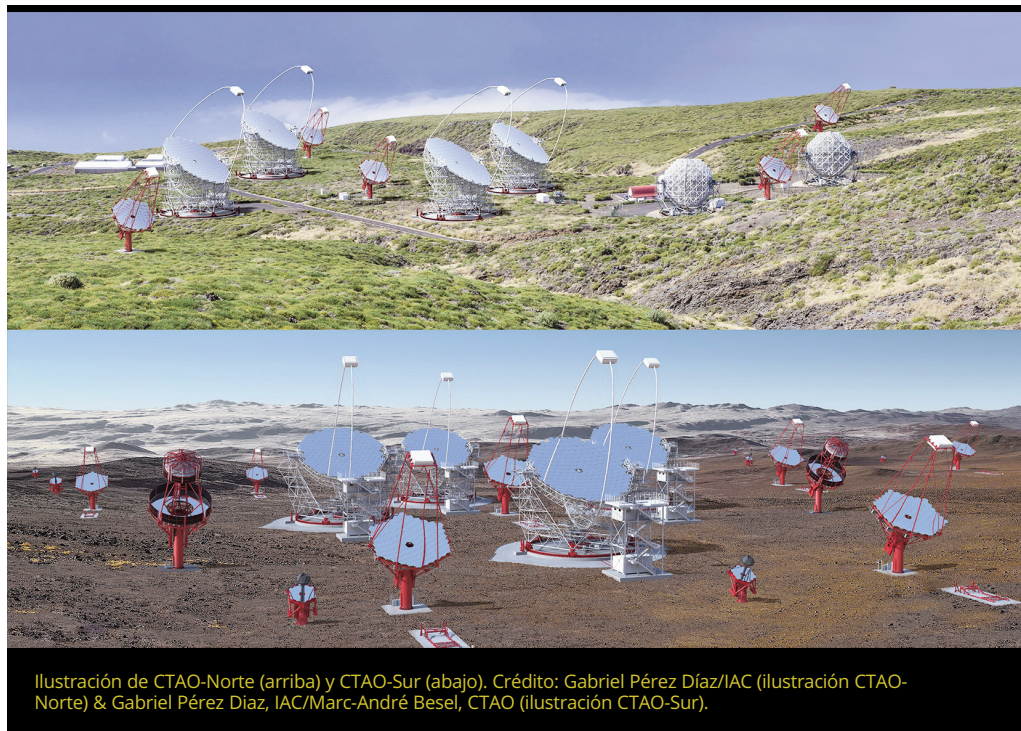


Ilustración de CTAO-Norte (arriba) y CTAO-Sur (abajo). Crédito: Gabriel Pérez Díaz/IAC (ilustración CTAO-Norte) & Gabriel Pérez Díaz, IAC/Marc-André Besel, CTAO (ilustración CTAO-Sur).

copios situados en dos emplazamientos: un conjunto de telescopios ubicado en el hemisferio norte (CTAO-Norte) en el Observatorio del Roque de los Muchachos del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) en La Palma, España, y otro en el hemisferio sur (CTAO-Sur) cerca del Observatorio de Paranal del Observatorio Europeo Austral (ESO) en Atacama, Chile. Además, cuenta con la sede central en un

edificio de INAF en Bolonia (Italia) y el Centro de Gestión de Datos Científicos, actualmente en construcción en el campus de DESY en Zeuthen (Alemania), donde trabaja el equipo de computación con el objetivo de proporcionar productos científicos, herramientas y apoyo a los futuros usuarios de los datos del Observatorio. En la actualidad, el CTAO está sumergido en una transición de entidad legal: en los



próximos meses, pasará del actual CTAO gGmbH (bajo las leyes alemanas), a cargo del diseño e implementación del Observatorio, al CTAO ERIC (Consortio Europeo de Infraestructuras de Investigación, por sus siglas en inglés), responsable de la construcción y operación del Observatorio. Y es que la creación de la entidad legal final es un hito fundamental en los más de treinta años de vida que tendrá el CTAO. El inicio del CTAO ERIC permite poner fin a la Fase de Diseño e iniciar la Construcción y Operación de este esperado Observatorio.

### INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

Pero adentrémonos en la innovadora tecnología que usará CTAO para explorar el universo a altas energías y los descubrimientos científicos que esperamos. Para observar el cielo, CTAO emplea los llamados telescopios cherenkov, que detectan los rayos gamma de manera indirecta: a su llegada a la Tierra, los rayos gamma interactúan con la atmósfera terrestre produciendo un par electrón/positrón. Estas partículas cargadas, a su vez, pueden dar lugar a fotones de más baja energía que derivan en otro par de partículas, que producen más fotones, que crean más partículas, y así sucesivamente. Es la llamada cascada de partículas o cascada electromagnética, cuyo desarrollo cesa al llegar a una determinada energía crítica. Estas partículas cargadas son increíblemente energéticas y se mueven más rápido que la luz en el aire de la atmósfera: nada es más rápido que la luz en el vacío, pero en un medio (como el aire) la luz se ralentiza, de manera que estas partículas pueden superar su velocidad. Al hacerlo, se emite una luz azulada/ultravioleta extremadamente rápida denominada luz cherenkov, en honor a su descubridor, el físico ruso Pavel A. Cherenkov. A pesar de ser azulada, no podemos verla con nuestros ojos porque dura apenas tres nanosegundos, con lo que necesitamos telescopios con cámaras extraordinariamente rápidas que capturen este destello, como los telescopios cherenkov del CTAO. Estos reflejan la luz cherenkov en sus superficies de espejo hacia las cámaras, compuestas por cientos o miles de detectores (tubos fotomultiplicadores o fotomultiplicadores de silicio) capaces de capturar mil millones de imágenes por segundo y que transforman la luz en señales eléctricas para su posterior análisis. La huella que deja la luz cherenkov proveniente de una cascada electromagnética sobre las cámaras tiene una característica forma de elipse, la cual se parametriza para obtener información sobre el rayo gamma

primario, como su energía o su dirección en el cielo. Cuantos más telescopios, más información precisa –por ejemplo, se puede mejorar la posición de llegada estimada del rayo gamma o el rechazo a eventos no iniciados por rayos gamma que no interesan para el análisis–.

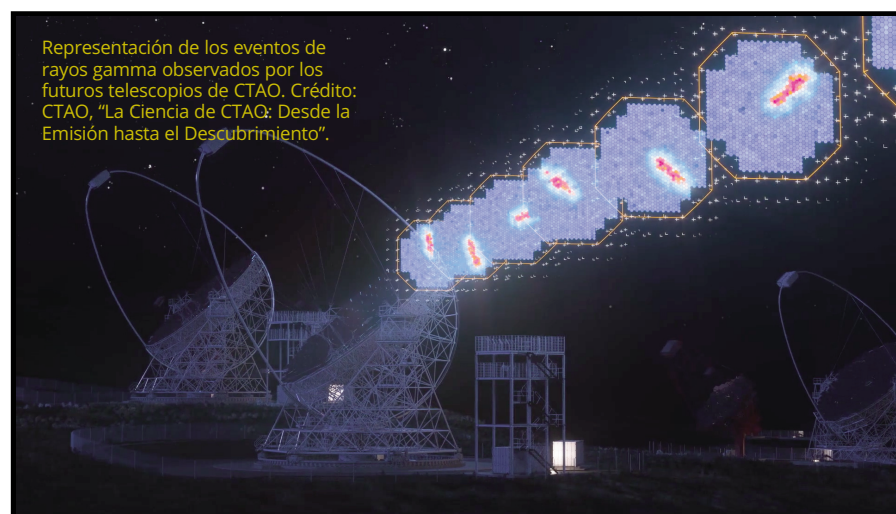
A diferencia de los instrumentos de rayos gamma de detección directa, como los satélites, cuya área de detección es muy limitada (alrededor de un metro cuadrado), la luz cherenkov producida por las cascadas de partículas se extiende en el suelo aproximadamente en un círculo de unos ciento veinte metros de radio. A partir de las decenas de gigaelectronvoltios (GeV), el flujo de rayos gamma comienza a ser bajo, con lo que el estudio de muy altas energías está dominado por la técnica cherenkov, cuya sensibilidad a partir de este rango energético es superior gracias a su mayor área de detección. Con amplios conjuntos de telescopios en ambos emplazamientos, un mejorado hardware y software que perfeccionarán, por ejemplo, la observación de fuentes transitorias y la discriminación de eventos de fondo, CTAO mejorará hasta en diez veces la sensibilidad a rayos gamma, además de aumentar la resolución angular y energética, con respecto a cualquier otro instrumento de detección directa o indirecta actualmente operativo. Esto abre una nueva ventana en el rango superior del espectro electromagnético, permitiendo expandir extraordinariamente el catálogo de objetos cósmicos conocidos con hasta mil fuentes nuevas de rayos gamma.

Pero para cubrir su excepcional rango energético (20 GeV – 300 TeV), CTAO necesitará tres clases de telescopios: los *Large-Sized Telescopes* (LSTs), los *Medium-Sized Telescopes* (MSTs) y los *Small-Sized Telescopes* (SSTs). Los LSTs están optimizados para el rango bajo de energía de

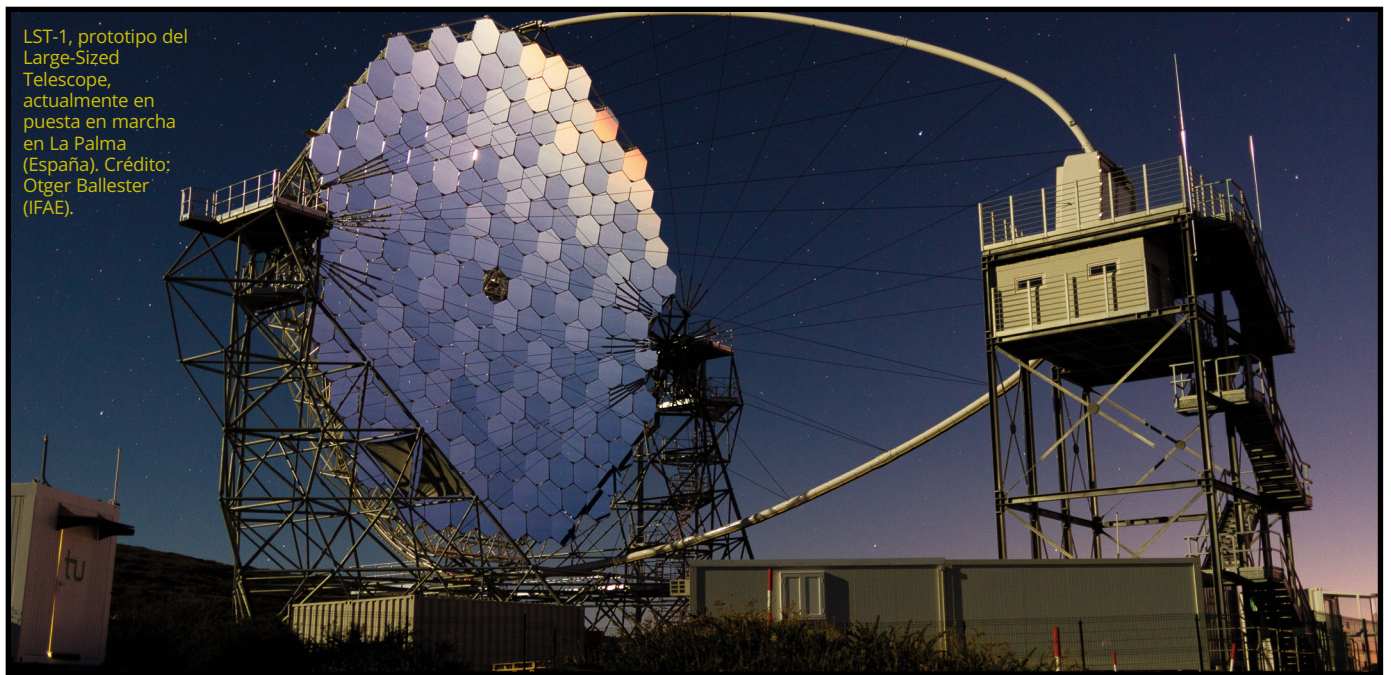


Simulación de una cascada atmosférica de partículas iniciada por un rayo gamma y la emisión de la luz Cherenkov. Crédito: CTAO, "La Ciencia de CTAO: Desde la Emisión hasta el Descubrimiento".

CTAO (desde los 20 GeV hasta los 150 GeV). Los rayos gamma de más baja energía producen poca luz cherenkov, por lo que se necesitan telescopios con grandes superficies de espejos capaces de reflejar toda la luz hacia la cámara. Por ello, los LSTs están formados por 198 espejos, creando una superficie reflectante de veintitrés metros de diámetro y cuatrocientos metros cuadrados. Para el rango intermedio (entre 150 GeV y 5 TeV), CTAO contará con los MSTs, cuyo espejo segmentado tiene un diámetro de doce metros cuadrados y un amplio campo de visión de ocho grados que permite rápidos barridos del cielo. Finalmente, con un diámetro de cuatro metros cuadrados y un diseño de doble espejo, tenemos los SSTs, optimizados para capturar las energías más altas (de 5 a 300 TeV). A pesar de que los rayos gamma más energéticos producen gran cantidad de luz cherenkov, su flujo es mucho menor, por lo



Representación de los eventos de rayos gamma observados por los futuros telescopios de CTAO. Crédito: CTAO, "La Ciencia de CTAO: Desde la Emisión hasta el Descubrimiento".



LST-1, prototipo del Large-Sized Telescope, actualmente en puesta en marcha en La Palma (España). Crédito: Otger Ballester (IFAE).

que se necesita un gran número de SSTs distribuidos a lo largo de varios kilómetros cuadrados para evitar perdernos estos eventos. Para su primera fase de construcción, la llamada Configuración Alfa, CTAO contará con cuatro LSTs y nueve MSTs a lo largo de unos 0.25 kilómetros cuadrados en CTAO-Norte (centrado pues en física extragaláctica) y con catorce MSTs y treinta y siete SSTs distribuidos en una superficie de unos tres kilómetros cuadrados en CTAO-Sur (optimizado para física galáctica).

Existen prototipos funcionales de todos los telescopios, pero solo uno de ellos está instalado en un emplazamiento del CTAO: el prototipo del LST, el LST-1, situado en CTAO-Norte. Este enorme telescopio de veintitrés metros de diámetro mide cuarenta y cinco metros de alto y pesa alrededor de cien toneladas. Sin embargo, es extremadamente ágil, con la capacidad de reposicionarse en solo veinte segundos para capturar breves señales de rayos gamma de baja energía. Su rápido reposicionamiento, así como su baja energía umbral, hacen del LST un telescopio clave para CTAO en el estudio de fuentes transitorias dentro y fuera de nuestra Galaxia, como los escurridizos brotes de rayos gamma. El LST-1 se inauguró en octubre del 2018 y ha avanzado rápidamente desde entonces en su puesta en marcha: captó su “primera luz” en diciembre de ese año, detectó su primera señal de rayos gamma procedente de la Nebulosa del Cangrejo en noviembre del 2019 y capturó, en un tiempo récord, el Púlsar del Cangrejo en junio del 2020. Además, es el primer elemento en superar

la denominada Revisión Crítica de Diseño, lo cual lo acerca a su aceptación formal como primer telescopio del CTAO.

La Colaboración del LST está formada por más de doscientos científicos de once países, incluyendo España –país que no solo alberga el emplazamiento CTAO-Norte, sino que juega un papel fundamental en el desarrollo de hardware y software para los telescopios-. Entre los grupos más destacados dentro del LST está precisamente el IAA-CSIC, miembro desde el 2019, que contribuye fuertemente tanto en la parte técnica como científica. Desde el instituto, Rubén López-Coto participa activamente en el desarrollo de este telescopio como miembro del Comité Ejecutivo del LST, Co-Coordinador de Software y Coordinador de Física Galáctica. Además, es miembro del Comité de Física y Asignación de Tiempo de la colaboración. Asimismo, en las próximas semanas y meses, saldrán a la luz los primeros artículos científicos desarrollados a partir de las primeras observaciones del LST-1, y ahí el IAA-CSIC estará también muy presente: los investigadores Iván Agudo, Rubén López-Coto y Juan Escudero contribuyen activamente o lideran estas publicaciones científicas.

### CIENCIA CON CTAO

Pero, ¿de qué ciencia estamos hablando? ¿Qué nos depararán las observaciones a altas energías con los telescopios del CTAO? El futuro de la astrofísica de rayos gamma desde tierra es muy emocionante, y es que esta rama de la astronomía es realmente joven: la primera fuente detectada a

energías de TeV con esta técnica fue la famosa Nebulosa del Cangrejo por el Telescopio Whipple en 1989, hace apenas treinta y cuatro años. Desde entonces, este campo se ha desarrollado rápidamente y diferentes telescopios cherenkov, como H.E.S.S. (Namibia), MAGIC (La Palma) o VERITAS (Arizona), han demostrado la viabilidad de la técnica logrando grandes avances científicos y descubriendo en torno a doscientas fuentes emisoras de rayos gamma. Su éxito ha resultado en un rápido crecimiento del interés por parte de la comunidad científica, pero, con tan pocos años de vida, este campo de la astronomía tiene por delante un enorme potencial e impacto científico y tecnológico. Entre los grandes temas de estudio que abarcará CTAO se encuentran:

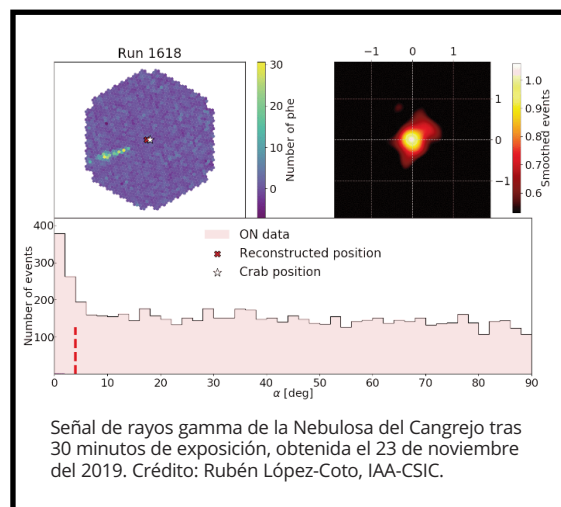
1. Comprender el origen de las partículas cósmicas relativistas y el papel que juegan : es imposible conocer el origen de los rayos cósmicos (partículas energéticas cargadas eléctricamente, como protones, núcleos de helio o electrones) a través de su observación directa, puesto que en su camino hacia la Tierra deben atravesar campos magnéticos interestelares e intergalácticos que los desvían. Su origen es rastreado a través de los rayos gamma que emiten cuando interactúan con materia o radiación en sus fuentes origen. Así, gracias a los rayos gamma, podemos abordar preguntas tales como: ¿Dónde y a través de qué mecanismos físicos se aceleran las partículas de más alta energía en el cosmos? ¿Qué efecto tiene su interacción en el universo? ¿Afectan a la formación de estrellas y a la evolución de galaxias?

2. Investigar los ambientes más extremos: CTAO estudiará los procesos físicos que suceden cerca de estrellas de neutrones o de agujeros negros, así como los chorros de partículas moviéndose a velocidades relativistas, vientos y explosiones que se producen en su vecindad, para entender cómo se producen estas estructuras y los sitios de emisión dentro de ellas. CTAO será también capaz de investigar los campos magnéticos y la radiación, así como su evolución, entre los llamados vacíos cósmicos, el vasto espacio existente entre las estructuras filamentosas que producen las galaxias y cúmulos de galaxias a grandes escalas.

3. Explorar las fronteras de la física fundamental: Una de las grandes incógnitas de la ciencia que CTAO intentará dilucidar es la naturaleza de la materia oscura. Basándose en las teorías actuales más predominantes, CTAO investigará las zonas del universo donde se espera mayor distribución de materia oscura con el objetivo de captar los rayos gamma que se emiten cuando las partículas de materia oscura se aniquilan. Asimismo, estudiará desviaciones de la teoría de la relatividad especial de Einstein investigando fenómenos que afectan a la propagación de la luz a distancias cosmológicas, tales como efectos gravitacionales cuánticos que dan lugar a pequeñas variaciones en la velocidad según su energía.

Así pues, los datos de CTAO son realmente prometedores y, lo más importante, serán accesibles para todo el mundo. El CTAO será el primero de su tipo abierto a las comunidades globales de astronomía y física de partículas como una fuente de datos astronómicos de altas energías. Con cientos de petabytes (PB) de datos en un año (tres PB de datos procesados), herramientas y apoyo a la comunidad mundial, las oportunidades de grandes descubrimientos están garantizadas.

Pero CTAO no sería posible sin la colaboración global de los más de mil quinientos miembros provenientes de ciento cincuenta institutos de veinticinco países que contribuyen con hardware y software o que colaboran en el desarrollo científico. Para esta última tarea, CTAO trabaja en estrecha colaboración con el *Cherenkov Telescope Array Consortium* (CTAC), grupo internacional de científicos e ingenieros que apoyan la definición del diseño de los diferentes instrumentos y el programa científico general. En la actualidad, el IAA-



CSIC es uno de los miembros españoles más importantes del CTAC, desde que se unió al consorcio en el 2014. La contribución del instituto es, por un lado, técnica a través del desarrollo de software, y por otro, científica y divulgativa. El IAA-CSIC es una de las instituciones españolas que lideran la contribución al desarrollo de Gammapy, el software de análisis de datos de alto nivel elegido oficialmente por CTAO en 2021 como herramienta de análisis científico para el Observatorio y que, en febrero del 2022, fue galardonado por el Ministerio de Educación Superior, Investigación e Innovación de Francia en los Premios de Ciencia Abierta para Software de Investigación. Dentro de este proyecto, el instituto ha participado activamente tanto en el desarrollo de código como en el Comité Coordinador. Por la parte científica, el IAA-CSIC ha colaborado dentro del CTAC en la definición de los casos científicos recogidos en el libro *Science with the Cherenkov Telescope Array* publicado por la editorial *World Scientific* en el 2019. Asimismo, Iván Agudo y Rubén López-Coto son miembros del Comité Internacional de Divulgación del Proyecto CTA, liderado por Alba Fernández-Barral,

visitante de larga duración del IAA-CSIC, y formado por sesenta investigadores e investigadoras que apoyan el programa divulgativo, educativo y comunicativo del CTAO a nivel global. Entre las actividades conjuntas entre los departamentos de comunicación del IAA-CSIC y del CTAO, cabe destacar la mesa redonda llevada a cabo el pasado año en el instituto y que reunió por primera vez en España a los responsables de CTAO, ESO y SKAO para hablar de la tecnología, ciencia y gobernanza de estas tres grandes infraestructuras.

En abril de este año, el grupo de rayos gamma del IAA-CSIC organizará la Reunión General del CTAO/CTAC en Granada, que acogerá a más de trescientas personas presencial y remotamente. El objetivo de la reunión, con sesiones paralelas y plenarias, es discutir los últimos avances hacia la construcción del Observatorio y la preparación de la ciencia. Una fecha clave para todos los miembros donde se esperan grandes noticias y novedades acerca del ERIC y que permitirá poner el foco en el IAA-CSIC, un instituto esencial en el desarrollo científico-tecnológico del mayor instrumento del mundo para la astrofísica de altas energías.

Está claro que las perspectivas para el CTAO combinan la garantía científica (una mayor comprensión de fuentes y mecanismos físicos actualmente conocidos) con la posibilidad de desvelar nuevos fenómenos y fuentes de rayos gamma, así como grandes descubrimientos, como la naturaleza de la materia oscura. Y, por supuesto, ampliando y estudiando el espectro electromagnético con una precisión nunca antes alcanzada, no podemos descartar descubrimientos inesperados. El CTAO abre así las puertas a una época muy emocionante en la astronomía, donde el IAA-CSIC juega y jugará un papel clave.



# RED BOOTES

## LA PRIMERA RED DE TELESCOPIOS ROBÓTICOS PRESENTE EN LOS CINCO CONTINENTES

El Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) ha culminado el desarrollo de la red BOOTES (acrónimo en inglés de Observatorio de estallidos y Sistema de exploración de fuentes esporádicas ópticas), la primera red de telescopios robóticos con estaciones en los cinco continentes. Con instalaciones en España (dos estaciones), Nueva Zelanda, China, México, Sudáfrica y Chile, constituye la red más completa de su clase y un recurso único y totalmente automatizado para combinar datos de instrumentos de todo el mundo, vigilar el cielo y apoyar las observaciones de misiones y satélites.

### UNA RED ROBÓTICA GLOBAL

“BOOTES es el resultado de casi veinticinco años de esfuerzo continuado, desde que en 1998 instalamos la primera estación en el INTA (Arenosillo, Huelva), institución que apoyó inicialmente el proyecto. El despliegue completo supone un hito científico ya que se trata de la primera red robótica con presencia en todos los continentes, por delante de los proyectos americano, cuya estación asiática se halla en construcción, y ruso, que carece de instalación en Oceanía”, destaca Alberto J. Castro-Tirado, investigador del IAA-CSIC que encabeza el proyecto desde su creación.

La red BOOTES está gestionada por el IAA-CSIC, con fuerte implicación de la Universidad de Málaga y con la colaboración con otras entidades españolas e internacionales. Su objetivo principal reside en observar rápidamente y de forma autónoma lo que se conoce como fuentes transitorias, objetos astrofísicos que no presentan una emisión permanente en el tiempo, sino que emiten luz de forma breve, intensa y repentina. La detección de estos eventos suele realizarse

desde satélite, y BOOTES proporciona una respuesta automatizada en tiempo real que permite su caracterización.

La red contribuirá al estudio de los estallidos de rayos gamma (GRBs), que constituyen los eventos más energéticos del universo y que se asocian con la muerte de estrellas muy masivas. Su detección suele producirse a través de satélites, que informan del estallido a la comunidad científica para que el evento pueda estudiarse en detalle. La existencia de una red de telescopios robóticos de muy rápido apuntado como BOOTES representa un complemento idóneo a la detección por satélite y, de hecho, BOOTES también trabajará en seguimiento y monitoreo de fuentes de neutrinos y objetos que emiten ondas gravitacionales, o incluso de objetos como cometas, asteroides, estrellas variables o supernovas. Pero también vigilará el cielo, tanto en el seguimiento de basura espacial como en el de objetos potencialmente peligrosos, que puedan suponer una amenaza para nuestro planeta.



# DECONSTRUCCIÓN



## CIENCIA DE ALTO IMPACTO CON BOOTES

Las observaciones de seguimiento rápido con BOOTES de los estallidos de rayos gamma, desde los primeros segundos hasta las fases finales, han permitido restringir los modelos de este tipo de fenómenos, y también han contribuido a algunos resultados de alto impacto de los últimos años. Uno de los observatorios de la red BOOTES fue, por ejemplo, la única estación española que observó en 2017 el evento conocido como GW170817, la quinta detección de la historia de ondas gravitatorias. El fenómeno responsable de esa emisión, la fusión de dos estrellas de neutrones, permitió el primer estudio simultáneo en luz y ondas gravitatorias por vez primera e inauguró una nueva era en las observaciones astronómicas. BOOTES contribuyó en 2020 a la identificación de una fuente productora de ráfagas de radio de muy corta duración en nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, que se presentó en tres artículos en la revista *Nature* que apuntaban a que un magnetar, una estrella de neutrones con un campo magnético muy intenso, se hallaría tras este fenómeno.

En 2021, BOOTES contribuyó al estudio, publicado también en *Nature*, de distintos pulsos en la llamarada magnética gigante de una estrella de neutrones: en apenas una décima de segundo, un magnetar liberó una energía equivalente a la que produce el Sol en cien mil años, y su análisis en detalle reveló múltiples pulsos en el pico de la erupción, que aportaron luz sobre estas aún poco conocidas llamaradas magnéticas gigantes.

“La culminación de la red supone un éxito, ya que ha sido posible con un equipo humano y un presupuesto muy inferior a los proyectos similares. Con cuatro estaciones en el hemisferio norte y tres en el hemisferio sur, siempre habrá al menos un telescopio que cubra el cielo norte y sur, lo que redundará en una enorme eficacia en la detección de fuentes transitorias.

Además, con todas las estaciones ya operativas, podemos coordinarlas como un único observatorio que cubra todo el planeta, cuyo potencial mostraremos a la comunidad internacional en el congreso de astrofísica robótica que celebramos bianualmente y que tendrá lugar en octubre en Málaga”, señala Castro-Tirado (IAA-CSIC). “Concebí el proyecto cuando desarrollaba mi tesis doctoral en Dinamarca hace treinta años, y para mí es un sueño hecho realidad”, concluye el investigador.



# EL MOBY DICK DE...

## ... ALICIA PELEGRINA (IAA-CSIC)

### CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

El primer día que crucé la puerta del Instituto de Astrofísica de Andalucía me sentí una privilegiada. El simple hecho de tener la posibilidad de trabajar en ese lugar me parecía ya un regalo. Estaba nerviosa. Cuando terminé mi entrevista salí llena de ilusión. Solo quedaba esperar. Francisco Tapia, que entonces formaba parte del departamento de recursos humanos, me dio la noticia. Aquella mañana fue un antes y un después en lo profesional y en lo personal. Hoy han pasado más de siete años desde aquella llamada, pero la ilusión y el orgullo de pertenencia siguen intactos. Han sido años frenéticos, en los que el IAA ha conseguido acreditar su excelencia científica, reflejo del equipo humano que hay detrás. Y estar ahí, formando parte de ese grupo de personas, es emocionante.

Pero, ¿qué hace una ambientóloga en un centro de astrofísica? Para responder esta pregunta tenemos que remontarnos a 1992. Aquel año, 1992, fue un año increíble: la exposición universal de Sevilla, los juegos olímpicos de Barcelona, la “inesperada” separación del Príncipe Carlos y Diana de Gales, la publicación del disco de Albert Pla *No solo de rumba vive el hombre* (aunque a la tercera cerveza algunos nos creemos que sí), y, además, aquel año fue posible que alguien de Talamanca del Jarama pudiera trabajar en París: comenzó la libre circulación de trabajadores en la CEE.

Pero es que, además, en 1992 ocurrió un hecho que sin duda marcó la historia, al menos la mía. En 1992, la Unión Astronómica Internacional puso sobre la mesa una preocupación que comenzaba a quitarles el sueño: la desaparición del cielo oscuro. Aunque no le hemos hecho mucho caso, sí es cierto que ya comenzamos a hablar con más frecuencia de una nueva problemática ambiental, la contaminación lumínica, que se suma al problema del cambio climático, la deforestación, la escasez de agua, etc.

Y es ahí donde una ambientóloga se abraza con las personas que trabajan en astronomía, y surgen cosas tan bonitas como la Oficina de Calidad del Cielo que pusimos en marcha en 2016 con el objetivo de proteger la calidad del cielo oscuro.



Imagen: Jorge Pastor.

#### Un problema creciente

La contaminación lumínica es un problema ambiental con un enorme componente social. No somos conscientes de que la luz es un agente contaminante que impacta en nuestra salud, el equilibrio de los ecosistemas y las observaciones astronómicas.

La contaminación lumínica no es una cuestión que esté a la espera de grandes desarrollos tecnológicos o avances científicos para poder hacerle frente. Las soluciones están ahí, encima de la mesa. El problema, y al mismo tiempo la solución, radica en nuestra concepción social del uso de la luz.

Culturalmente, la luz es sinónimo de bienestar, de belleza, de sociedad avanzada, de estatus y de seguridad. Así que inevitablemente la solución al problema pasa por un cambio de concepción que solo podremos conseguir a través de la sensibilización ambiental o de la divulgación científica que, para mí, en este caso, vienen a ser lo mismo: contar ciencia para generar conciencia.

Nuestra sociedad ha asumido durante años que la actividad humana y el desarrollo tienen una cara B que pasa por la destrucción del entorno natural, la pérdida de biodiversidad, la generación masiva de residuos, el empeoramiento de la calidad del aire, etc. Si algún vecino galáctico (en caso de que los hubiera) nos estuviera espionando, no podría entender lo que ve: unos seres extraños destruyendo su propio hogar. Hemos llegado a una situación límite en la que, si no actuamos, no habrá marcha atrás. Y en este contexto nos encontramos con la contaminación lumínica. Un tipo de contaminación que no duele, ni provoca envenenamiento inmediato, ni provoca olores desagradables

Doctora en Ciencias Ambientales por la Universidad de Granada y Experta en Promoción y Gestión de Proyectos y Actividades Internacionales de I+D+i por la Universidad Politécnica de Madrid. Es la responsable de la Oficina Técnica Severo Ochoa-IAA y forma parte de la Oficina Calidad del Cielo del IAA-CSIC. Desde el comienzo de su trayectoria profesional ha participado en diversas iniciativas de sensibilización ambiental. Ahora, sigue generando conciencia ambiental contando ciencia.

en el vecindario. Un problema ambiental que no asusta, pero que provoca la mortalidad masiva de algunas aves, desequilibra los ecosistemas, es un factor clave en la disminución de los insectos y provoca importantes alteraciones en nuestra salud, algunas de ellas asociadas a enfermedades muy graves. Y no frena. Los últimos datos de los que disponíamos, correspondientes al año 2017, indicaban que el brillo artificial del cielo nocturno (una de las manifestaciones más notables de la contaminación lumínica) crecía en torno al 2,2% anual. Mientras escribo estas líneas, se ha publicado una actualización de estos datos: un nuevo trabajo concluye que el brillo nocturno artificial de la Tierra está aumentando un 10% cada año desde hace al menos una década.

#### Qué sabemos de...

La luz artificial es un elemento indispensable en nuestro modelo social, pero es importante que conozcamos las consecuencias de un uso inadecuado, y solo así dispondremos de la información suficiente para hacer una evaluación personal y crítica. Hace apenas unos meses, la colección *Qué Sabemos de*, coeditada por el CSIC y la editorial Catarata, publicaba el libro *La contaminación lumínica*. Ha sido todo un reto estar detrás de esas páginas y nace con el único objetivo de democratizar el conocimiento, acercándolo a toda la sociedad para que esta evaluación personal y crítica sea posible. Ojalá que el resultado de esta nos lleve a reclamar un cambio en el modelo de iluminación, más eficiente y respetuoso con el medio, entendiendo que nuestro bienestar personal está relacionado con el bienestar del planeta. Entonces el objetivo último de este libro, “ser una herramienta de concienciación que nos permita hacer de este, nuestro planeta, un lugar mejor, por nosotros y por los que vendrán”, será una realidad.

CARMEN MORALES DURÁN

## Pionera en astrofísica en España

**BENJAMÍN MONTESINOS**  
**CENTRO DE ASTROBIOLOGÍA (CAB),**  
**CSIC-INTA.**  
**SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA,**  
**PRESIDENTE.**

El día 16 de febrero de 2022 recibimos la triste noticia del fallecimiento de nuestra compañera Carmen Morales Durán. Carmen desarrolló prácticamente toda su carrera en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), primero en los Grupos Científicos de la Comisión Nacional de Investigación del Espacio (CONIE, 1976-1990), y a partir de 1991 en el Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental (LAEFF), y en el Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA), hasta su jubilación. Carmen ocupó durante muchos años el puesto de Jefa de Área de Astrofísica en la División de Ciencias del Espacio de INTA.

Carmen -Mamen para los más allegados- fue una de las pioneras de la astronomía en España, cuando esta disciplina comenzaba a despegar en nuestro país. Una compañera de su generación recordaba sus clases en la Facultad de Física de la Universidad Complutense de Madrid, dentro de la incipiente especialidad de astrofísica como profesora ayudante de Instrumentación Astronómica, con un trato muy cercano hacia los alumnos.

Demos algunas pinceladas de su carrera: cuando hace casi veinte años el concepto de los archivos astronómicos -sobre todo los de telescopios terrestres- era todavía bastante exótico, y el de un "observatorio virtual" prácticamente ciencia ficción, Carmen apostó por estas iniciativas y lideró el primer proyecto del Observatorio Virtual Español, hoy uno de los ejes del Departamento de Astrofísica del CAB, que alberga, entre otros, los archivos del Gran Telescopio Canarias (GTC) y de Calar Alto (CAHA), de misiones espaciales como el *International Ultraviolet Explorer* (IUE), COROT y la *Optical Monitoring Camera* de INTEGRAL, además de proporcionar servicios muy variados a la comunidad. Nada de lo alcanzado en los últimos veinte años en ese ámbito hubiera sido posible sin su apoyo.



Otro de sus hitos fue el trabajo como Investigadora Principal por parte española del instrumento EURD (Espectrógrafo Ultravioleta extremo para la Radiación Difusa), un instrumento que voló a bordo de Minisat-01, el primer minisatélite español, a mediados de los años 90. Este instrumento se diseñó y construyó a través de una colaboración entre el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y la Universidad de California en Berkeley. El instrumento tenía una sensibilidad entre cien y mil veces mayor y una resolución espectral diez veces mejor que las de instrumentos similares anteriores en su rango de longitudes de onda (350 - 1100 Å).

El centro de control y análisis de los datos de Minisat-01, bajo la dirección de Antonio Talavera, residía en el Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental (LAEFF) -hoy des-

aparecido, pero que fue germen del grupo de astrofísicos del CAB- un centro dependiente de la División de Ciencias del Espacio de INTA, donde el equipo dirigido por Carmen Morales en colaboración con José Francisco Gómez (actualmente miembro del IAA), y Joaquín Trapero (hoy en la Universidad de Victoria, Canadá), interpretaba los datos aportados por EURD.

Los objetivos científicos del EURD incluían el estudio de la radiación difusa en el ultravioleta extremo, originada principalmente en la fase caliente del medio interestelar, y del brillo atmosférico nocturno. El experimento también obtenía espectros de estrellas brillantes y, cada mes, el espectro de la Luna llena.

Uno de los objetivos más atractivos de este instrumento era intentar confirmar o refutar la hipótesis formulada por Dennis Sciama, uno de los padres de la cosmología moderna, acerca de la naturaleza de la materia oscura, explicada gracias a la existencia de un neutrino masivo, cuya desintegración produciría emisión en el ultravioleta extremo, en el rango cubierto por EURD; los datos recogidos durante el periodo de vida de Minisat-01 fueron cruciales para descartar esa hipótesis.

Los intereses científicos de Carmen Morales giraron siempre en torno a la física estelar (estrellas calientes, variables luminosas azules -o LBVs, de su nombre en inglés-) y a las características del medio interestelar, como la extinción.

Entre las condolencias recibidas desde la comunidad astronómica española, es una constante el agradecimiento de muchas astrónomas jóvenes a quienes Carmen abrió la primera puerta para iniciarse en esta apasionante disciplina, destacando su esfuerzo para realizar una carrera científica y a la vez conciliar su trabajo con la vida familiar.

Por encima de su carrera investigadora, todos los que tuvimos la suerte de conocerla o compartir lugar de trabajo con ella coincidimos en resaltar su bondad, generosidad y carácter afable, y su sonrisa perenne. La recordaremos como una gran persona, que es lo mejor que se puede decir de alguien.



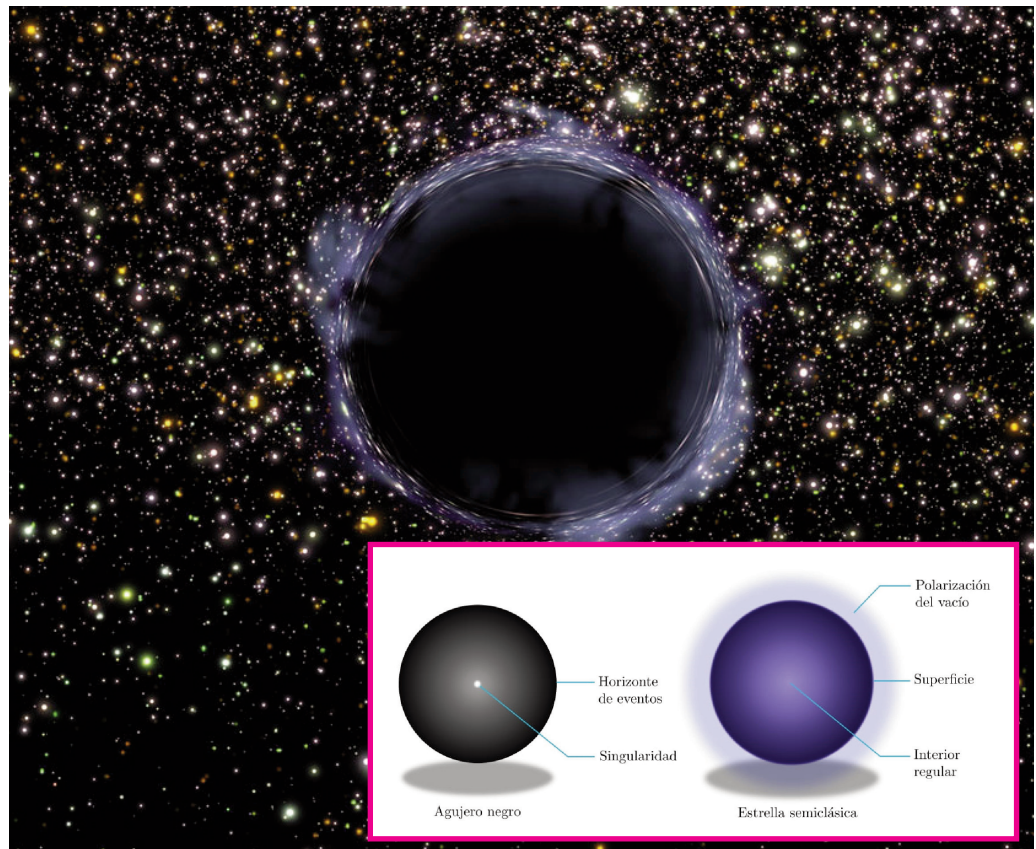
## Un estudio apunta a la existencia de estrellas tan compactas como los agujeros negros

**EL IAA-CSIC ENCABEZA UN ESTUDIO TEÓRICO QUE MUESTRA QUE ALGUNOS DE LOS OBJETOS CATALOGADOS COMO AGUJEROS NEGROS PODRÍAN SER EN REALIDAD ESTRELLAS ULTRACOMPACTAS**

Aunque las estrellas y los agujeros negros constituyen a priori objetos claramente distintos, de un estudio teórico recién publicado emerge una extraña pregunta: ¿Estamos confundiendo un tipo muy compacto de estrellas con agujeros negros? La clave se halla en un factor, la polarización del vacío, que permite que existan estrellas mucho más compactas de lo que se pensaba, con densidades similares a las de los agujeros negros. El estudio se ha publicado en la revista *Scientific Reports*.

Las estrellas pueden presentar desde densidades medias, como la de nuestro Sol, a las altísimas densidades de las estrellas 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, 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.

“La relatividad general predice la existencia de un límite a cómo de compacta puede ser una estrella, conocido



como límite de Buchdahl. Así, cualquier objeto que supere este límite debe ser un agujero negro, pues para objetos tan compactos no hay estructura material conocida que pueda soportar su propia gravedad”, apunta Julio Arrechea, investigador del IAA-CSIC que encabeza el trabajo. Los agujeros negros estelares se producen, precisamente, por el colapso del núcleo de una estrella de muy alta masa. Son los objetos más compactos conocidos, con enormes cantidades de materia contenidas en un diámetro muy pequeño y, de hecho, su fuerza gravitatoria es tan intensa que ni la luz puede escapar de ellos.

“En nuestro estudio hemos trabajado con un factor que afecta al límite de compactidad de las estrellas: la relatividad general estándar no tiene en consideración un fenómeno muy conocido

en el electromagnetismo, la polarización del vacío, que tiene asociada una densidad de energía y que, según la idea central de la relatividad general, también debería ser una fuente de gravedad”, señala Carlos Barceló, investigador del IAA-CSIC que participa en el trabajo.

La polarización del vacío se comporta como si hubiera una nube adicional de materia, que denominan materia semiclassical, además de la materia convencional, o clásica. Esta nube de materia semiclassical presenta propiedades muy peculiares que la materia clásica no puede reproducir, y puede incluso albergar energías negativas en ciertas situaciones. Mientras que en estrellas poco compactas como el Sol la polarización del vacío es un fenómeno despreciable, sí resulta relevante en situaciones cercanas al límite de Buchdahl.

En el trabajo recién publicado, que analiza la estructura de estrellas constituidas por materia clásica y semiclassical, el equipo científico encuentra, debido a las peculiaridades de la materia semiclassical, estrellas relativistas más compactas que lo que establece el límite de Buchdahl.

“Este tipo de estrellas semiclassical podrían ser perfectamente confundidas con agujeros negros, pues pueden ser casi tan compactas como ellos. Esto nos lleva a preguntarnos si los objetos a los que en la práctica astrofísica denominamos agujeros negros son realmente agujeros negros y no estrellas semiclassical ultracompactas. Las nuevas capacidades observacionales prometen una década apasionante para discernir la verdadera naturaleza de estos objetos”, concluye Julio Arrechea (IAA-CSIC).



## Determinan cómo se aceleran las partículas en los chorros de un agujero negro supermasivo

**EL IAA-CSIC PARTICIPA EN UN ESTUDIO QUE PLANTEA QUE LAS ONDAS DE CHOQUE PODRÍAN HALLARSE EN EL ORIGEN DE LA ACELERACIÓN DE LAS PARTÍCULAS EN LOS CHORROS**

Los blázares, un tipo de galaxia activa, son las fuentes de energía continua más potentes del universo. Al igual que el resto de las galaxias activas, muestran una estructura formada por un agujero negro supermasivo central rodeado de un disco de materia que lo alimenta, pero se hallan entre el 10% de las galaxias activas que presenta un chorro de materia que emerge de ambos polos a altísima velocidad, y entre el porcentaje aún menor de casos en los que su orientación nos permite ver el chorro casi de frente. Ahora, un estudio responde a una pregunta irresoluble durante décadas: ¿cómo se aceleran las partículas de estos chorros hasta alcanzar energías tan altas?

Un equipo científico internacional ha empleado datos del *Explorador de Polarimetría de Rayos X* (IXPE, por sus siglas en inglés), para esbozar la respuesta, que se publica en la revista *Nature* y que plantea que la explicación para la aceleración de las partículas se hallaría en una onda de choque dentro del chorro.

El satélite IXPE, en órbita terrestre, es una colaboración entre la NASA y la Agencia Espacial Italiana con participación de científicos del IAA-CSIC en España, que proporciona un tipo de datos nunca antes accesibles, como la dirección e intensidad media del campo eléctrico de la luz en rayos X. El nuevo estudio utilizó IXPE para observar Markarian 501, un blázar

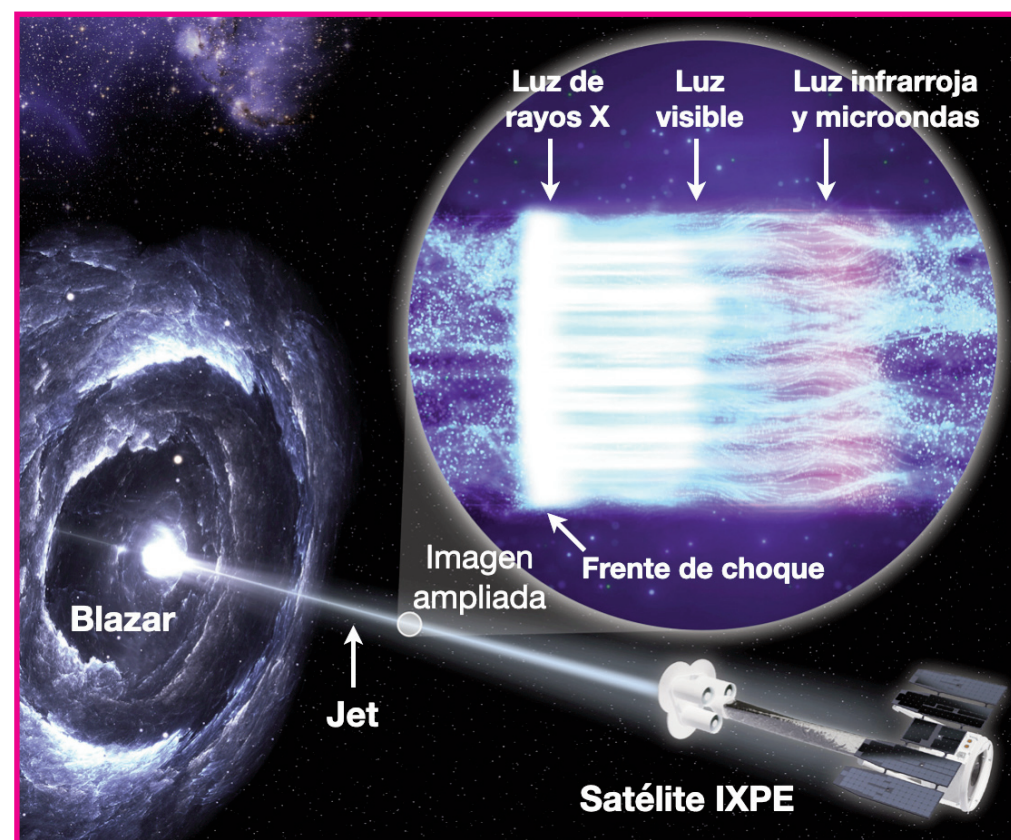


Ilustración en la que las observaciones del satélite IXPE sobre el blázar Markarian 501 muestran cómo las partículas de alta energía en el chorro (azul) golpean la onda de choque (blanco) emitiendo rayos X y, al alejarse, emanan luz de menor energía: primero visible, luego infrarroja y finalmente de microondas y radio. / Pablo García (NASA).

situado en el centro de una gran galaxia elíptica. Durante las observaciones, el equipo empleó además de observatorios espaciales, telescopios en tierra con capacidad de detectar la radiación polarizada para recopilar información sobre el objeto en una amplia gama de longitudes de onda, incluyendo microondas, luz visible y rayos X.

Es la primera vez que se ha observado la polarización de la luz en rayos X en las regiones cercanas a la fuente de aceleración de las partículas, y el análisis en distintas longitudes de onda ha revelado que la luz en rayos X muestra mayor polarización que la óptica, que a su vez se halla más polarizada que la emitida en microondas. Sin embargo, la dirección de la

polarización coincide en todas las longitudes de onda observadas y se halla alineada con la dirección del chorro. La comparación de los datos con modelos teóricos mostró que el escenario más viable implica 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.

“La novedad y la relevancia de este resultado reside en que las nuevas observaciones de rayos X con sensibilidad a la polarización, combinada con nuestras observaciones desde tierra, solo favorecen el mecanismo de ace-

leración de partículas en ondas de choque”, apunta Iván Agudo, coordinador del grupo del IAA-CSIC que participa en el estudio.

A medida que las partículas aceleradas se desplazan hacia el exterior del choque, emiten primero rayos X, ya que son extremadamente energéticas. Al desplazarse hacia el exterior, la región energizada se vuelve cada vez más turbulenta conforme se aleja del lugar del choque, y las partículas comienzan a perder energía, lo que produce emisión en longitudes de onda menos energéticas, como visible y microondas. Se trata de un fenómeno análogo a la forma en que el flujo de agua se vuelve más turbulento después de encontrarse con una cascada.

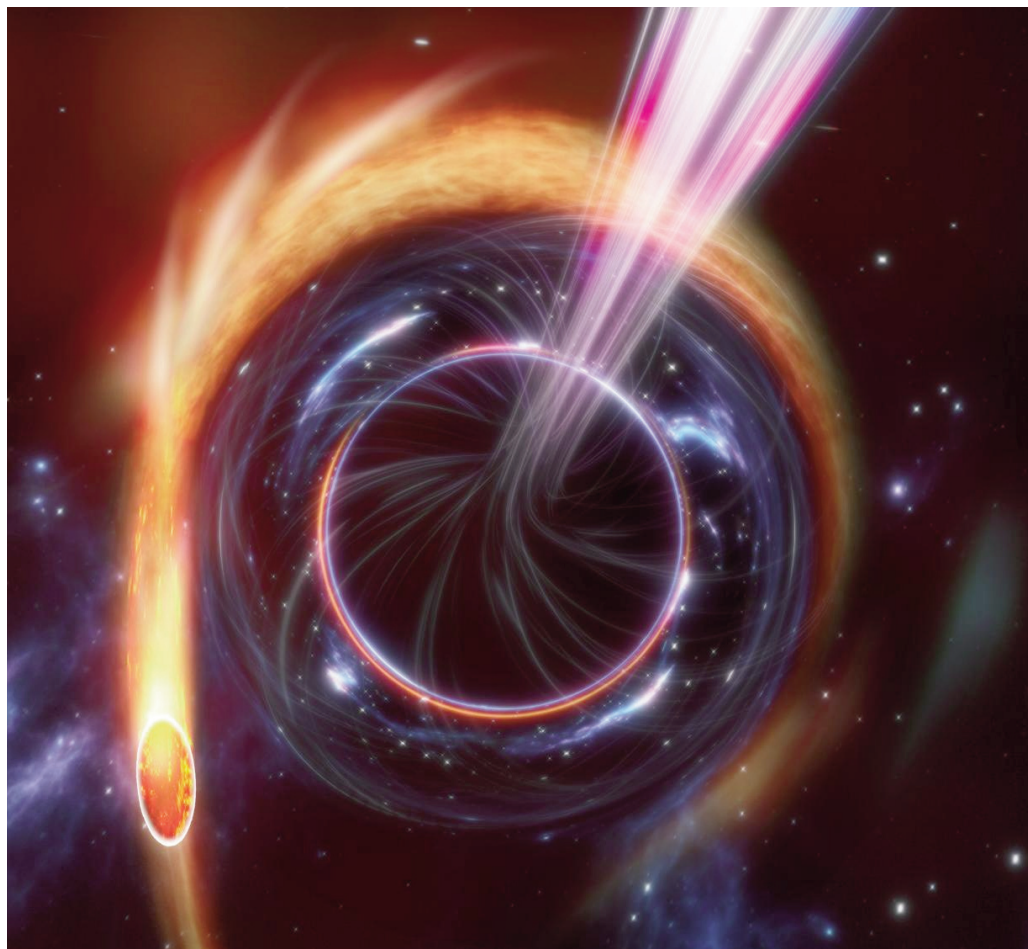
## Detectan el chorro de materia que emerge de un agujero negro supermasivo al devorar una estrella

EL IAA-CSIC PARTICIPA EN DOS ARTÍCULOS QUE ANALIZAN ESTE FENÓMENO, MUY RARAMENTE OBSERVADO

Aprincipios de 2022, el observatorio *Zwicky Transient Facility* detectó un extraordinario destello donde, la noche anterior, no brillaba nada. Con una intensidad equivalente a mil billones de soles, este fenómeno fue estudiado por distintos grupos científicos desde numerosos observatorios y se han publicado, en *Nature* y *Nature Astronomy*, dos artículos en los que participa el IAA-CSIC y que coinciden en el origen del destello: se trata de un chorro producido por un agujero negro supermasivo al devorar una estrella.

La mayoría de las galaxias albergan en sus regiones centrales agujeros negros supermasivos, que contienen hasta miles de millones de veces la masa del Sol. Se trata de objetos con un campo gravitatorio tan intenso que ni la luz puede escapar, y muestran una estructura formada por un disco de gas y polvo -el disco de acrecimiento-, que absorbe el material de su entorno. “Gran parte del tiempo, sin embargo, los agujeros negros supermasivos no devoran nada –explica Miguel Pérez-Torres, investigador del IAA-CSIC que participa en el artículo de *Nature Astronomy*–. Así, un fenómeno como este, que conocemos como eventos de disrupción por mareas, puede brindarnos una oportunidad única para estudiar la vecindad de estos poderosos objetos”.

El escenario es relativamente bien conocido: la estrella es desgarrada por las fuerzas de marea del agujero negro, pasa a formar parte de su disco y termina siendo engullida por él. “Sin embargo, en algunos casos extrema-



Conceptión artística de la disrupción de una estrella por un agujero negro supermasivo. Crédito: Carl Knox (*OzGrav, ARC Centre of Excellence for Gravitational Wave Discovery, Swinburne University of Technology*).

damente raros, el agujero negro expulsa chorros de materia que viajan casi a la velocidad de la luz en el proceso de destrucción y acreción del material de una estrella –señala José Feliciano Agüí Fernández, investigador del IAA-CSIC y coautor del trabajo publicado en *Nature*–. Los cálculos apuntan a que estos chorros se producen solo en el 1% de los casos, y eso fue precisamente lo que observamos”. De hecho, el destello luminoso del evento, denominado AT2022cmc, se encuentra entre los más brillantes jamás observados. La fuente es también la más lejana detectada, a unos 8.500 millones de años luz de distancia. Parece hallarse en el centro de una galaxia que aún no es visible por-

que la luz de AT2022cmc la eclipsó, pero cuando el episodio finalice podría ser fotografiada por los telescopios espaciales Hubble o James Webb. ¿Cómo un evento tan lejano se observa tan brillante desde tierra? Los dos trabajos que analizan el fenómeno concluyen que el chorro del agujero negro podría estar apuntando directamente hacia la Tierra, lo que hace que la señal parezca más brillante que si el chorro apuntara en cualquier otra dirección. El efecto, denominado “refuerzo doppler”, es similar al sonido amplificado de una sirena que pasa.

Sin embargo, aún se desconoce por qué algunos eventos de disrupción por mareas producen chorros y otros no. “Nuestro trabajo apunta a 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, una idea que nos acerca a la comprensión de la física de los agujeros negros supermasivos en el centro de galaxias situadas a miles de años luz de distancia”, concluye José Feliciano Agüí Fernández (IAA-CSIC).

## Una colisión estelar que brilló casi un minuto complica el escenario de las explosiones estelares

**EL IAA-CSIC PARTICIPA EN EL ESTUDIO DE UNA EXPLOSIÓN DE RAYOS GAMMA (GRB) CUYAS CARACTERÍSTICAS EXIGEN UNA REVISIÓN DEL MARCO TEÓRICO QUE EXPLICA ESTOS ESTALLIDOS**

Las explosiones de rayos gamma (GRBs) son los fenómenos más energéticos del universo, detectables incluso si se producen en galaxias a miles de millones de años luz. Se clasifican como cortos o largos en función de si duran más de dos segundos, y su duración se asocia a su origen: los estallidos largos se producen con la muerte de estrellas muy masivas, mientras que los cortos se relacionan con la fusión de dos objetos compactos, como estrellas de neutrones, agujeros negros o ambos. Ahora, la detección de un GRB de casi un minuto producido por la colisión de objetos compactos complica el escenario, ya que muestra que la clasificación de estos estallidos según su duración no responde del todo a la realidad y abre nuevos escenarios en la muerte de las estrellas.

“Al estudiar el estallido, denominado GRB211211A, observamos indicios claros que apuntaban a una kilonova, producida en la fusión de dos estrellas de neutrones, y no a una supernova, la explosión con la que terminan su vida las estrellas muy masivas –señala José Feliciano Agüí Fernández, investigador del(IAA-CSIC que participa en el estudio, publicado en *Nature*–. De hecho, la luminosidad, duración y color de la



kilonova son similares a otro evento muy conocido que se produjo en 2017, una fusión de estrellas de neutrones que constituyó la primera observación de un evento cósmico en luz y en ondas gravitatorias”.

Las estrellas de neutrones son objetos muy compactos y de rápida rotación que surgen cuando una estrella muy masiva expulsa su envoltura en una explosión de supernova. 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–.

La firma característica de las kilonovas es su brillo en el infrarrojo cercano, muy superior a su brillo en luz visible. Esta diferencia se debe a que los elementos pesados expulsados por la kilonova bloquean la luz visible pero no la infrarroja, que presenta una longitud de onda mayor. “Sin embargo, observar en el infrarrojo cercano es un desafío técnico y pocos telescopios en tierra lo consiguen. Este hallazgo ha sido posible gracias los telescopios gemelos Gemini, que nos mostraron que estábamos ante una fusión de estrellas de neutrones”, señala Jillian Rastinejad, investigadora de la Universidad de Northwestern (EEUU) que encabeza el trabajo.

Las conclusiones del equipo científico, que empleó también datos de otros telescopios, entre ellos el Telescopio Espacial Hubble, el Gran Telescopio Canarias (La Palma) o el telescopio de 2.2 metros del Observatorio de Calar Alto (Almería), coinciden con las obtenidas por otro grupo que, tras estudiar el estallido con distinto enfoque y observaciones, también concluyó que el estallido se produjo por una kilonova. “Podimos observar este evento solo porque estaba muy cerca de nosotros –apunta Alberto

Castro-Tirado, investigador del IAA-CSIC y coautor de este segundo trabajo, que también incluye datos obtenidos por el telescopio de 2.2 metros de Calar Alto–. Solo después de descartar otras posibilidades nos dimos cuenta de que nuestro paradigma de una década tenía que ser revisado”.

Además de contribuir a nuestra comprensión de las kilonovas y los GRBs, este descubrimiento proporciona 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.

## Entre cuatro y cinco estrellas participaron en la formación de la nebulosa del Anillo Sur

**EL IAA-CSIC PARTICIPA EN UN ESTUDIO QUE APUNTA A LA INTERACCIÓN DE UN SISTEMA MÚLTIPLE DE ESTRELLAS EN LA FORMACIÓN DE LA NEBULOSA**

Las nebulosas planetarias constituyen una de las etapas finales en la vida de estrellas similares al Sol. Tras agotar su combustible, estas estrellas se desprenden de sus capas externas, que forman una envoltura fluorescente en torno a una estrella enana blanca (el núcleo de la estrella tras la expulsión de sus capas exteriores). Estas nebulosas pueden adoptar multitud de formas, y algunas se relacionan con la existencia de sistemas dobles de estrellas. Ahora, el telescopio espacial James Webb (JWST) ha revelado que la nebulosa del Anillo Sur muestra al menos dos y posiblemente tres estrellas más hasta ahora invisibles, que produjeron las formas oblongas y curvas de la nebulosa.

Un equipo internacional ha analizado diez imágenes detalladas del JWST (NASA, ESA, y CSA) de esta estrella moribunda y, al combinarlas con datos del observatorio Gaia (ESA), ha podido además conocer que la estrella central, que ahora presenta una masa aproximada del 60% con respecto a la solar, tenía casi tres veces la masa del Sol antes de expulsar sus capas externas. Conocer la masa inicial permitió al equipo reconstruir la escena y determinar cómo pudieron crearse las formas de esta nebulosa, en las que estuvo implicada la estrella central y varias acompañantes.

“Con el JWST es como si nos dieran un microscopio para examinar el universo –apunta Orsola De Marco, investigadora de la Universidad de Macquarie

que encabeza el trabajo–. Abordamos nuestro análisis de forma muy parecida a como los forenses reconstruyen la escena”.

El equipo se centró primero en la estrella que se desprendió de sus capas y que sigue rodeada de polvo. Es habitual que estas estrellas envejecidas muestren discos de polvo a su alrededor, pero en este caso los datos apuntan a que ese polvo, procedente de una única estrella, fue arrojado en direcciones diferentes por las estrellas compañeras.

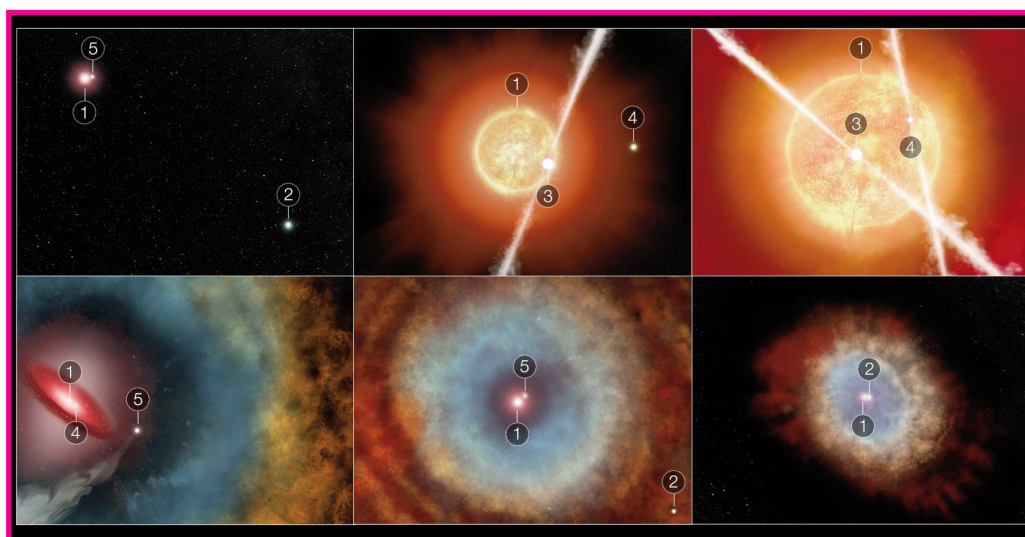
El estudio propone que, antes de que la estrella moribunda se desprendiera de sus capas, interactuó con una o incluso dos estrellas compañeras más pequeñas. Durante este “baile”, las estrellas podrían haber lanzado chorros en direcciones opuestas, que más tarde se plasmaron como las proyecciones aproximadamente emparejadas que ahora se observan en los bordes de la nebulosa.



Crédito: NASA, ESA, CSA, y O. De Marco (Macquarie University). Procesado de imágenes: J. DePasquale (STScI).

¿Dónde están ahora esas estrellas compañeras? “O bien son tan débiles que las ocultan las dos brillantes estrellas centrales, o bien se han fusionado con la estrella moribunda”, apunta Martín A. Guerrero, investigador del IAA-CSIC que participa en el trabajo. Las complejas formas de la nebulosa del Anillo Sur constituyen un indicio de la presencia de compañeras invisibles, ya que sus eyecciones son finas en algunas zonas y gruesas en otras. Una

tercera estrella en estrecha interacción podría haber desviado los chorros, girando sus direcciones iniciales. Una cuarta estrella con una órbita ligeramente más amplia podría haber revuelto más aún estas eyecciones, generando el enorme conjunto de anillos en los extremos exteriores de la nebulosa. Finalmente, una quinta estrella, que se observa brillante y azulada en las imágenes, orbita la estrella moribunda lenta y tranquilamente.



¿Cómo crearon hasta cinco estrellas la nebulosa del Anillo Sur? El recuadro 1 muestra un campo más amplio con las estrellas 1, 2 y 5, la última de las cuales orbita alrededor de la estrella 1 mucho más estrechamente que la estrella 2. El recuadro 2 amplía la escena y aparecen otras dos estrellas (3 y 4); la estrella 3 emite chorros. El recuadro 3 muestra la expansión de la estrella 1 a medida que envejece. Tanto la estrella 3 como la 4 emiten una serie de chorros. En el panel 4 ampliamos la imagen para ver cómo la luz y los vientos estelares están esculpiendo una cavidad en forma de burbuja. La estrella 1 está rodeada por un disco de polvo. En el quinto panel, la estrella 5 interactúa con el gas y el polvo expulsados, generando el sistema de grandes anillos que se ve en la nebulosa exterior. El sexto panel muestra la escena tal y como la observamos hoy día. Créditos: NASA, ESA, CSA, E. Wheatley (STScI)

## ESPRESSO y CARMENES descubren dos exotierras en la zona habitable de una estrella cercana al Sol

**EL IAA-CSIC PARTICIPA EN EL DESCUBRIMIENTO DE UN SISTEMA PLANETARIO MÚLTIPLE EN TORNO A GJ1002**

Un equipo científico internacional ha hallado dos planetas de tipo terrestre en órbita alrededor de la estrella GJ 1002, una enana roja situada a menos de dieciséis años luz del Sistema Solar. Ambos planetas se encuentran en la zona de habitabilidad de la estrella, y su cercanía los sitúa como candidatos idóneos para estudios atmosféricos. El hallazgo ha sido posible gracias a los espectrógrafos ESPRESSO (ubicado en el Very Large Telescope, en Chile) y CARMENES, situado en el telescopio de 3.5 metros del Observatorio de Calar Alto y codesarrollado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC). También ha contado con datos fotométricos del Observatorio de Sierra Nevada, perteneciente al IAA-CSIC, imprescindibles para la confirmación de candidatas a planetas.

“La naturaleza parece empeñada en demostrarnos que los planetas terrestres son muy habituales. Con estos dos, ya conocemos siete en sistemas planetarios muy cercanos al Sol”, apunta Alejandro Suárez Mascareño, investigador del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) que encabeza el trabajo.

Ambos planetas presentan masas similares a la de la Tierra y se encuentran en la zona de habitabilidad de su estrella, o la región en la que las condiciones de presión y temperatura permitirían la existencia de agua líquida en superficie. GJ 1002 b, el planeta interior, tarda poco más de diez días en completar una

órbita a su estrella. Por su parte, GJ 1002 c necesita poco más de veintidós días.

GJ 1002 es una enana roja de apenas un octavo de la masa del Sol. Al tratarse de una estrella fría y débil, su zona de habitabilidad se halla muy cerca de la estrella. “Estas estrellas son muy interesantes por lo frías que son; se trata de un tipo de objetos que buscamos explorar a fondo con el brazo infrarrojo de CARMENES y con MARCOT, una instalación astronómica modular para espectroscopia de alta resolución que se está desarrollando en el Observatorio de Calar Alto”, señala Pedro J. Amado, investigador del IAA-CSIC que coordinó el desarrollo de CARMENES y que participa en el hallazgo.

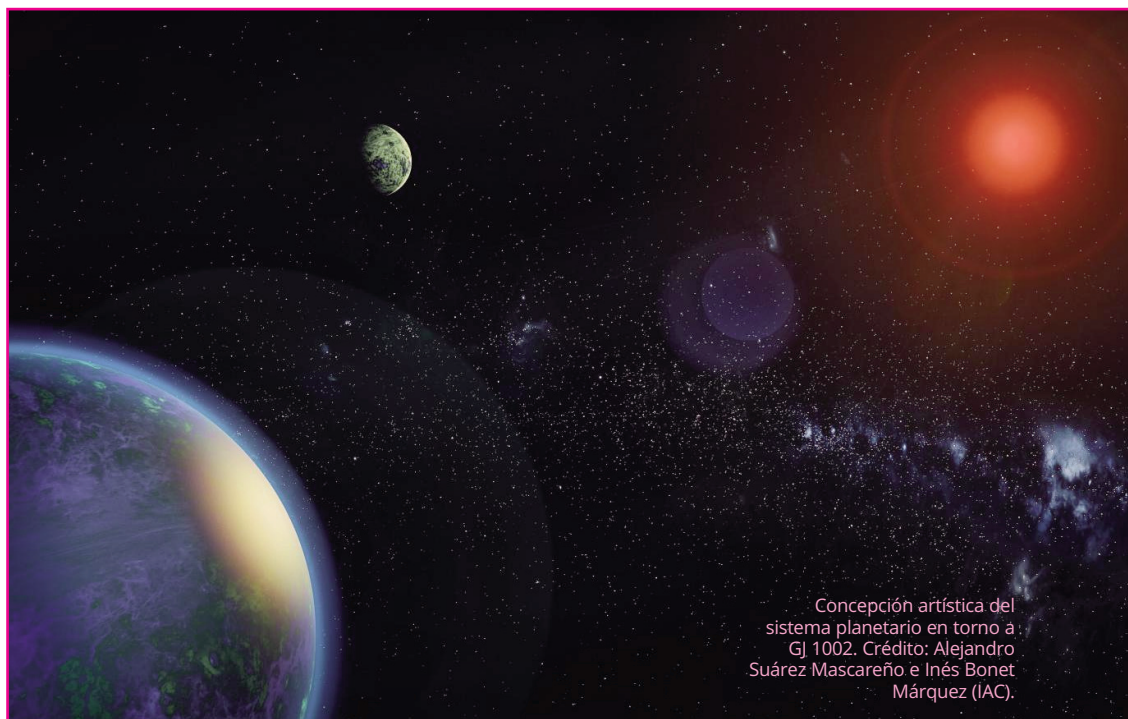
La cercanía de la estrella hace que los dos planetas, en especial GJ 1002 c, sean excelentes candidatos para caracterizar sus atmósferas

analizando la luz que reflejan o su emisión térmica. Por ejemplo, el futuro espectrógrafo ANDES, que se ubicará en el Telescopio Extremadamente Grande (ESO) y en cuyo desarrollo participan el IAC y el IAA-CSIC, podrá estudiar la presencia de oxígeno en la atmósfera de GJ 1002 c. Ambos planetas, además, cumplen con las características para convertirse en objetivos de la futura misión espacial LIFE, actualmente en fase de estudio.

Debido a su baja temperatura, GJ 1002 es demasiado débil en luz visible para que la mayoría de espectrógrafos puedan medir las pequeñas oscilaciones que los planetas producen en la estrella, o sus variaciones en velocidad radial. El descubrimiento ha sido posible gracias a una colaboración entre los consorcios de ESPRESSO y CARMENES.

GJ 1002 fue observada por CARMENES entre 2017 y 2019, y entre 2019

y 2021 por ESPRESSO. El diseño de CARMENES, mucho más extendido hacia el rojo que otros espectrógrafos enfocados a velocidad radial, le permitió estudiarla desde el telescopio de 3.5 metros de Calar Alto. Por su parte, la combinación de ESPRESSO y el poder de captación de luz del *Very Large Telescope* permitieron obtener medidas con una precisión de apenas treinta centímetros por segundo, inalcanzables para casi cualquier otro instrumento en el mundo. Finalmente, las medidas fotométricas obtenidas desde el Observatorio de Sierra Nevada (OSN, IAA-CSIC) permitieron confirmar las detecciones. “Cualquiera de los dos grupos habría tenido muchas dificultades si hubiera afrontado este trabajo de forma independiente. Juntos pudimos llegar mucho más lejos de lo que lo habríamos hecho por separado”, concluye Alejandro Suárez Mascareño (IAC).



Concepción artística del sistema planetario en torno a GJ 1002. Crédito: Alejandro Suárez Mascareño e Inés Bonet Márquez (IAC).

# La formación de galaxias en el universo

**PILARES**

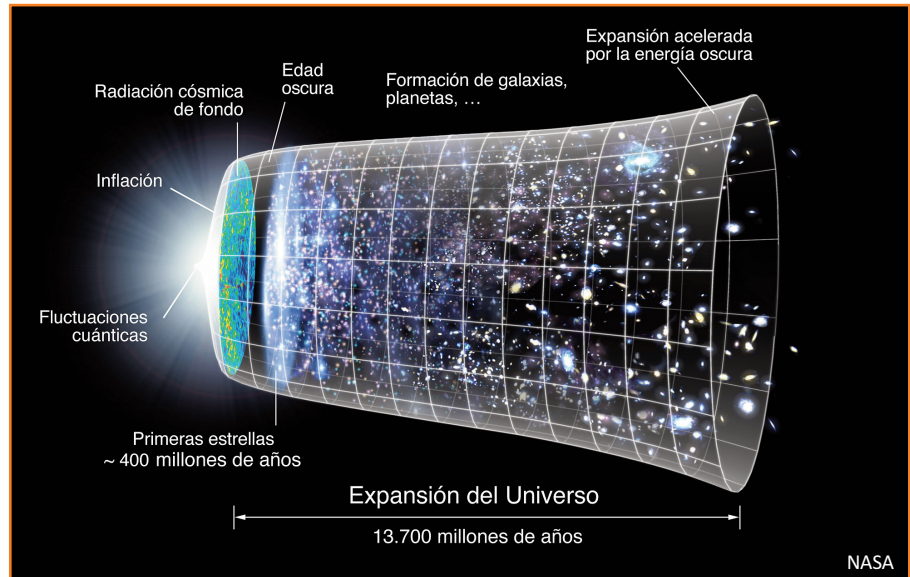
Hace aproximadamente 13.800 millones de años, se produjo el Big Bang: todo nuestro universo estaba contenido en un punto inimaginablemente denso, mucho más pequeño que una partícula subatómica, y, en cuestión de billonésimas de segundo, se expandió de forma colosal.

En estos instantes iniciales, la temperatura era tan elevada que toda la materia estaba descompuesta y solo se podían encontrar núcleos de hidrógeno, helio, electrones libres y radiación (cuya partícula elemental es el fotón). Aun así, la densidad de

partículas de materia era tal que un fotón era incapaz de recorrer grandes distancias sin toparse con electrones o núcleos de materia: había una interacción constante entre materia y radiación.

Gracias a la expansión continua del universo, cuando este poseía unos 380.000 años se produjo un descenso de las temperaturas que permitió que los electrones fuesen “atrapados” por los núcleos y, de esta manera, surgieron los primeros átomos de hidrógeno y helio. Esto a su vez supuso una reducción del número de partículas de materia con las que interactuaban los fotones en su camino, lo que les permitió viajar ininterrumpidamente. Desde entonces, estos fotones han continuado su recorrido e impregnan todo el universo en forma de una radiación fósil muy uniforme, conocida como Radiación Cósmica de Fondo (o Fondo Cósmico de Microondas, CMB).

El cosmos ha cambiado mucho desde la sopa homogénea e isotrópica de materia que era entonces hasta convertirse en el universo poblado de estructuras que observamos hoy. La teoría más popular actualmente postula que diminutas fluctuaciones en la densidad de la materia original fueron las semillas a partir de las cuales estas estructuras comenzaron a crecer. Es decir, en la sopa homogénea había “grumos” de densidad mayor



(un 0,01% mayor) alrededor de los cuales se acumulaba materia debido a los efectos de la gravedad y esta acumulación dio lugar a las galaxias, definidas como conjuntos de estrellas, gas, polvo y materia oscura que se mantienen unidos por efecto de la atracción gravitatoria.

Hoy día, para explicar cómo se forman, prevalece lo que se conoce como el Modelo Jerárquico. Las primeras galaxias no eran tan grandes como las espirales y elípticas que observamos en el universo cercano, sino que eran menores y presentaban formas irregulares; a medida que el cosmos evolucionaba, comenzaron a crecer al fusionarse unas con otras. Este crecimiento es continuo hasta una época, unos mil o dos mil millones de años después del Big Bang, que se conoce como Mediodía Cósmico, donde se produjo el máximo de formación estelar del universo. Es en este momento cuando se forman estrellas a mayor velocidad y los discos espirales se desarrollan. Tras este punto álgido, las galaxias empiezan a envejecer y se reduce la tasa de formación de estrellas.

Asimismo, existe un escenario algo distinto, que se da en los entornos más densos, en cúmulos de galaxias, donde otro mecanismo

permite su crecimiento: enormes galaxias colisionan entre sí, fusionándose, y se forman galaxias elípticas.

Existen principalmente tres estrategias para estudiar la formación de galaxias. En primer lugar, en galaxias muy locales, como la Vía Láctea, se buscan vestigios del pasado, fósiles galácticos, y se deduce cómo se formaron. Por otra parte, se estudian galaxias formadas entre unos mil y dos mil millones de años después del Big Bang, durante el Mediodía Cósmico. Estas galaxias jóvenes eran más pequeñas y menos metálicas y, analizándolas, se puede deducir su evolución y se extrapola cómo surgieron. Se trata de la forma más común de estudiar la formación galáctica en nuestros tiempos. Debido a las limitaciones de los telescopios actuales, no se ha tenido acceso a las primeras galaxias y estrellas, creadas escasos trescientos o cuatrocientos millones de años tras la gran explosión, para observar directamente sus orígenes. No obstante, gracias al telescopio espacial Webb, se cree que pronto será posible alcanzar esta primera generación, lo que aclarará muchas de las incertidumbres que rodean la formación de galaxias.

# INCERTIDUMBRES

En astronomía, cuanto más lejos miramos, más atrás en el tiempo nos remontamos. Al observar un cuerpo celeste, no vemos su presente, pues la luz que emite tarda un tiempo en alcanzarnos. Por ejemplo, cada vez que observamos la Luna, la vemos como era hace 1.3 segundos. En el caso del Sol, observamos su apariencia de hace 8 minutos y 17 segundos. Así, si la luz de una galaxia tarda en alcanzarnos 13.200 millones de años, la estaríamos visualizando tal y como era en el universo primitivo.

Los equipos actuales no han permitido aún observar la primera etapa de formación de estrellas y galaxias y, sin poder mirarla directamente, las teorías de formación se basan en simulaciones y extrapolación de datos obtenidos al estudiar estas galaxias primitivas.

Por ello, existen dudas sobre qué se forma primero, las estrellas o las galaxias. Es decir, ¿primero se forman las galaxias y después surgen las estrellas, ya dentro de ellas? ¿O las estrellas se van desarrollando

“sueeltas” y las galaxias las atraen posteriormente?

Tampoco se sabe con certeza qué crece primero en una galaxia primigenia, o a qué ritmo absorbe galaxias más pequeñas. Lo que sí se sabe es que estas crecen y crecen hasta el Mediodía Cósmico y luego desaceleleran su ritmo de formación estelar.

Otra incertidumbre es el papel que juegan los agujeros negros supermasivos de sus centros, que varían notablemente en tamaño. Estos agujeros negros son especialmente relevantes en las galaxias activas, que cuentan con un disco de acreción y emiten gran cantidad de radiación. La radiación creada en estos núcleos genera vientos y mecanismos que hacen que el gas deje de condensarse, regulando la manera en la que la galaxia crece: puede frenar la formación estelar o, si se detiene, la puede acelerar. Y, aunque se piensa que es un elemento muy relevante, se desconoce cómo influye exactamente este agujero negro activo en el crecimiento de galaxias. Las galaxias satélite son otro punto de inte-

rés. En las dos últimas décadas se ha producido una explosión en la detección de estas galaxias en el Grupo Local, al que pertenece la Vía Láctea, pero, a pesar de los nuevos descubrimientos, el número aún no se halla en concordancia con las predicciones teóricas, que sugieren un número muy superior. Se puede argumentar que esto se debe a que, muchas veces, las galaxias satélite no cuentan con gran cantidad de estrellas. Son simples halos de materia oscura y, por tanto, indetectables.

El telescopio James Webb es una revolución y gracias a él se van a poder descubrir muchas de las incógnitas actuales. Con un espejo mayor que el del Hubble y capacidad de ver en infrarrojo, este telescopio es capaz de observar galaxias distantes con la misma calidad que si se estuviesen viendo galaxias locales en la parte óptica del espectro.

Las estrellas de la Población III - aquellas de la primerísima generación - se consideran relevantes en la formación de galaxias y, aunque de momento no se ha detectado ninguna, su búsqueda se halla entre los objetivos del telescopio Webb. En el Instituto de Astrofísica de Andalucía se está desarrollando el Proyecto Estallidos, que busca evidencias de estas estrellas, caracterizadas por ser mucho más grandes y energéticas, vivir muy poco tiempo, explotar como hipernovas y ser responsables de eyectar la primera generación de elementos pesados al universo.

El Webb puede también romper algunos de los esquemas del modelo actual: a finales de julio, nada más comenzar su misión de veinte años, encontró una candidata a considerarse la galaxia más antigua observada. Se llama GLASS-z13 y se estima que tiene 13.500 millones de años, por lo que se formó unos trescientos millones de años después del Big Bang. Es una galaxia pequeña e irregular, lo que se ajusta a las expectativas, pero es notablemente más brillante de lo que los expertos esperarían para una galaxia tan primitiva. Además, Webb ha hallado galaxias más masivas de lo que cabría esperar, escasos quinientos millones de años tras la gran explosión.

Estos descubrimientos implicarían que, de confirmarse las observaciones, habría que revisar los conocimientos actuales sobre cómo se formaron las galaxias y a qué velocidades e, incluso, podría significar que comenzaron a formarse antes de lo que se cree.



ESO/L. Calçada.

# RECOMENDADOS

## 11 DE FEBRERO. DÍA INTERNACIONAL DE LA MUJER Y LA NIÑA EN LA CIENCIA

En la actualidad, las mujeres y niñas encuentran barreras de muchos tipos, a veces muy sutiles, que dificultan su presencia en la ciencia. Esta desigualdad es patente en la elección de los estudios por parte de las niñas y se va agudizando al avanzar en las carreras científicas y tecnológicas. Con el objetivo de lograr el acceso y la participación plena y equitativa en la ciencia para las mujeres y las niñas, la igualdad de género y el empoderamiento de las mujeres y las niñas, el 15 de diciembre de 2015 la Asamblea General de las Naciones Unidas proclamó el 11 de febrero de cada año como el Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia.

La web <https://11defebrero.org/> acoge el listado completo de las actividades desarrolladas a lo largo de nuestra geografía, y recoge una enorme variedad de materiales de acceso y descarga online.

### ¿ESA PREGUNTA ES PARA MÍ?

Cinco astrónomas del IAA responden preguntas enviadas por de escolares de primaria. Con la participación de Olga Muñoz Gómez (Científica Titular), Camilla Danielski (Doctora contratada), María del Carmen Pastor Morales (Contrato Titulado Superior ATP), Belén Martínez Mondejar (Contrato Predoctoral de Formación de Doctores FPI), Teresa Toscano Domingo (Contrato Predoctoral de Formación de Doctores FPI).

[bit.ly/3F7EL9Y](https://bit.ly/3F7EL9Y)

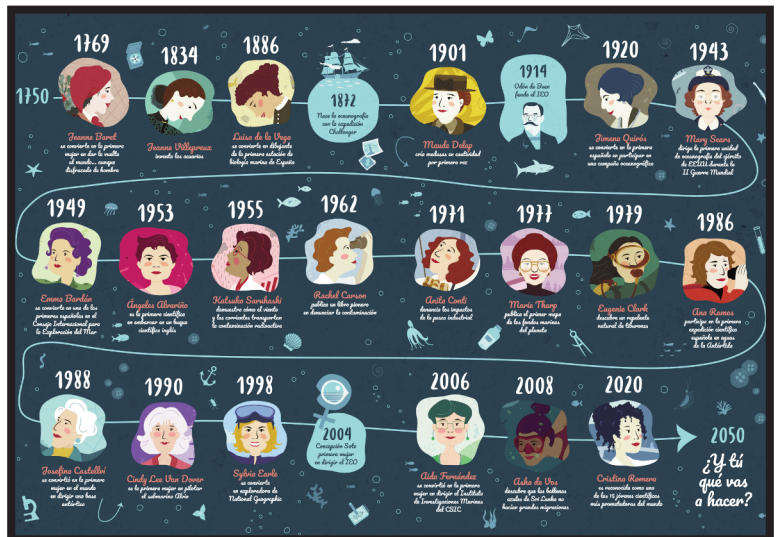


## OCEÁNICAS: LA MUJER Y LA OCEANOGRAFÍA

El proyecto “Oceánicas: la mujer y la oceanografía” tiene como objetivo divulgar el trabajo de científicas dedicadas al estudio de los océanos, tanto actuales como del pasado, dar a conocer su vida y obra, tratando así de generar vocaciones científicas en niñas y niños, fomentar su creatividad, su capacidad de decisión y el trato igualitario frente a las desigualdades de género desde edades tempranas.

El proyecto incluye multitud de materiales, entre ellos el libro “Oceánicas: pioneras de la oceanografía”, que cuenta la vida y obra de 20 científicas marinas ilustres, desde la primera y única mujer que dio la vuelta al mundo durante la época de las grandes exploraciones, hasta mujeres que a día de hoy lideran la lucha por la conservación de los océanos.

[oceanicas.ieo.es](https://oceanicas.ieo.es)



## LA SERIE 'TERRITORIO GRAVEDAD' SE ESTRENA EN TELEVISIÓN Y EN PLATAFORMAS

A medio camino entre el documental y la ficción, “Territorio Gravedad” propone una visita al cosmos tomando como elemento vertebrador la gravedad, la ‘misteriosa’ interacción que está en su origen y en su compleja forma actual. Los cuatro primeros capítulos se emitieron en La2, en el espacio Documenta2. La primera temporada puede disfrutarse en Filmin y, como vídeo a demanda, en Vimeo. La serie ha sido promovida por la Sociedad Española de Gravitación y Relatividad y coproducida por el IAA-CSIC y la productora LIPSSYNC MEDIALAB.

[www.gravityland.eu](https://www.gravityland.eu)

