

# IAA

# 70

JULIO DE 2023  
revista.iaa.es

Información y actualidad astronómica

Revista de divulgación del Instituto de Astrofísica de Andalucía

## ¿Agujeros negros o estrellas negras?



Ilustración artística de J. C. (ES)



**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

¿Agujeros negros o estrellas negras? ... 3  
SO-IAA. Objetivo final: ¡terminar con un nuevo comienzo! ... 7  
El Moby Dick de ... Laura Hermosa Muñoz (CAB, INTA-CSIC) ... 11  
Deconstrucción. Misión DART ... 12  
Historias ... Lo que la ciencia unió y separó ... 14  
Actualidad ... 16



## España se adhiere al Observatorio SKA para participar en la construcción de la mayor instalación radioastronómica del planeta

El Consejo de Ministros aprobó en abril la adhesión de España como miembro de pleno derecho al Observatorio SKA (SKAO), una organización intergubernamental que está construyendo dos radiotelescopios complementarios de primera categoría que constituirán una de las infraestructuras científicas más grandes y ambiciosas del planeta.

La fase inicial de construcción de los telescopios del SKAO, que abarca el periodo de 2021 a 2030, tendrá un coste total de 2.022 millones de euros. España aportará a esta fase del pro-

yecto un total de 41,4 millones de euros, de los que ya se han abonado 7,9 millones de euros entre 2021 y 2022 (5,1 proceden del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia). En 2023 está previsto aportar 2,5 millones de euros de presupuesto nacional.

La formalización de la incorporación de España al SKAO como miembro de pleno derecho permite ahora la participación de empresas españolas en los contratos para la construcción de los dos radiotelescopios, gracias al princi-

pio de retorno que se aplica en esta organización internacional.

Actualmente está garantizada la participación de empresas españolas en, al menos, cinco contratos de construcción del SKAO. La industria española incrementará así su capacitación en las múltiples tecnologías de vanguardia y técnicas de macrodatos que son indispensables para el funcionamiento del SKAO y que se están desarrollando específicamente para llevar a cabo este singular proyecto.

Además, gracias a esta adhesión, los

científicos españoles podrán realizar observaciones pioneras llamadas a propiciar descubrimientos transformadores en el estudio del universo.

“Estamos realmente agradecidos por el apoyo de nuestros colegas de SKAO a lo largo de los años. Ha sido increíble haber llegado a este punto, y hemos disfrutado mucho del camino hasta conseguirlo trabajando conjuntamente con el Ministerio, el CDTI y la comunidad astronómica. Ahora podemos seguir adelante con actividades aún más desafiantes y emocionantes como parte del SKAO”, destaca la coordinadora de la participación española en SKA, Lourdes Verdes-Montenegro (IAA-CSIC).

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

## ¿AGUJEROS NEGROS O ESTRELLAS NEGRAS?

**LA PALABRA DESASTRE ESTÁ COMPUESTA POR EL SUFIJO DIS- (SEPARACIÓN POR MÚLTIPLES VÍAS) Y ASTRO (ESTRELLA). LA PALABRA, DEL LATÍN ASTROLÓGICO, DESIGNABA LA OBSERVACIÓN DE UN CATACLISMO ESTELAR POR EL QUE UNA ESTRELLA O CUERPO FULGURANTE CUALQUIERA OBSERVADO EN EL CIELO, SE DESINTEGRABA EN MIL DIRECCIONES HASTA DESAPARECER DE NUESTRA VISTA**

Julio Arrechea (IAA-CSIC)

—EN ESA DIRECCIÓN SE DEBERÍA OBSERVAR EL CISNE —dijo Asterio mientras apuntaba hacia la negrura con la cámara de su móvil—. Dicen que hay un agujero negro, ¿no?

—¿Por qué lo dices como si hubiese atisbo de duda? —replicó Nocturnio, tras un breve silencio—. Es bien sabido que Cygnus X-1 es un agujero negro con todas las de la ley. ¿O sigues insistiendo en que no existen?

—El último artículo que enviamos sobre este tema a una revista fue rechazado con un informe de una línea. Tras varios meses de trabajo. Yo ya no creo en nada.

—¿Ahora eres nihilista? Debe de ser agotador.

“Agotadores son tus chascarrillos”, pensó Asterio. “Agujeros negros... Me cuesta aceptar la existencia de objetos así en el universo. ¿Singularidades que indican la ruptura del propio espacio-

tiempo? ¿Horizontes tras los cuales ni siquiera la luz puede escapar? De modo que si quisiéramos conocer qué secretos esconden deberíamos sacrificar nuestra existencia misma. El parecido con la muerte es escalofriante...”.

—Ahora en serio —dijo Asterio, intentando apaciguar sus angustias—. ¿Cómo estás tan convencido de que las estrellas dejan un agujero negro tras ellas al morir?

—¿Otra vez con la misma cantinela? Me apoyo en los resultados de la teoría de la relatividad general de Einstein, ni más ni menos. Su publicación en 1915 dio lugar al marco conceptual que nos informa de que la gravedad es la curvatura del espacio-tiempo. Como demostró Karl Schwarzschild poco después, en 1916, las ecuaciones de Einstein albergan unas soluciones tan elegantes como misteriosas cuando se las estudia en vacío, esto es, en ausencia de cualquier

sustancia material. Estas soluciones son las que pasarían a conocerse como agujeros negros.

En un principio —continuó—, la solución representa el espacio-tiempo exterior a una estrella de cierta masa. Cuando esta estrella se comprime por debajo de lo que se conoce como su radio gravitacional, la solución de Schwarzschild se hacía patológica precisamente en esta superficie. Tuvieron que pasar casi cincuenta años hasta que, en 1960, Martin Kruskal y George Szekeres demostraron que tal patología era una artimaña de los sistemas de coordenadas utilizados para describir el espacio-tiempo, y que en realidad el radio gravitacional era una región bien descrita.

Por otro lado —prosiguió—, Robert Oppenheimer y James Harmon Snyder encontraron soluciones que describen el colapso gravitatorio de una nube de

polvo autogravitante. Por polvo, te recuerdo que entendemos una distribución esférica de partículas libres cuyas presiones son despreciables entre sí, de modo que ninguna fuerza se opone a la contracción gravitatoria. Estas soluciones, que se piensa describen de forma aproximada el colapso de una estrella supermasiva cuando sus presiones internas son incapaces de hacer frente a la gravedad, tendrían a la solución de Schwarzschild tras cierto tiempo.

—Algo que me perturba acerca de los agujeros negros —intervino Asterio—, o sea de la solución de Schwarzschild, es que toda la materia que formaba la estrella precursora se ha precipitado más allá del horizonte hacia una singularidad. Según la relatividad general, la singularidad central de un agujero negro es una región de curvaturas infinitas, donde la propia naturaleza clásica del espacio-tiempo se desmorona. Sin embargo, las estrellas que orbitan en las cercanías del “presunto” agujero negro central de nuestra galaxia sienten su enorme atracción gravitatoria. Si un agujero negro es esencialmente vacío, no se corresponde tanto con un objeto estelar, sino con una configuración del espacio-tiempo en sí misma. Si a esto le añadimos que el horizonte de sucesos delimita precisamente la región a partir de la cual ni siquiera la luz puede escapar, lo que hace que sean estrictamente imposibles de observar, ¿cómo puedes estar tan convencido de su existencia?

—Conuerdo en que son nociones contraintuitivas, pero eso es parte de lo que hace la física: desafiar a la intuición y mostrar un mundo más extraño que lo que dictan nuestros sentidos. De hecho, el mismo Einstein murió creyendo que estas soluciones no eran realistas. En realidad, fueron las observaciones de cuásares de los años 60 las que empezaron a cambiar la situación. Sabes de lo que hablo, ¿no?

—Conozco perfectamente las observaciones de cuásares de los años 60. ¿Me las recuerdas? “Me ha pillado”, pensó Asterio.

—Los investigadores de ahora estáis tan absortos en vuestros trabajos que los árboles no os dejan ver el bosque. Los cuásares son objetos que, en la esfera celeste, brillan con una magnitud aparente equiparable a la de estrellas de nuestra galaxia. Sin embargo, mediante análisis espectrales fue posible demostrar que se encuentran a miles de millo-

nes de años luz. Tal emisión energética solo es alcanzable en el disco de acreción de un agujero negro.

—En eso estoy de acuerdo —asintió Asterio, quien recordaba nebulosamente alguna clase de astrofísica extragaláctica—. Se trata del mecanismo astrofísico más eficiente que se conoce para transformar materia en radiación. Pero eso lo que nos garantiza es que la superficie del objeto en sí, o su presunto horizonte, si quieres, no refleja la radiación como un espejo.

—Solo digo cómo históricamente los agujeros negros abandonaron el terreno de la especulación teórica y comenzaron a ganar peso entre la comunidad —replicó Nocturnio. No sé si eres consciente de la gravedad del asunto. El agujero negro es el mejor modelo teórico del que disponemos por la sencilla razón de que no hay alternativa.

Porque, pese a que desconocemos de qué están compuestas realmente, las estrellas de neutrones poseen unos límites máximos de masa, más allá de los cuales se vuelven inestables. Aún más, la relatividad general impone un límite máximo a cómo de compacta puede ser cualquier estructura en equilibrio hidrostático. Por equilibrio hidrostático me refiero al principio físico que permite la misma existencia de estrellas en el universo: el balance entre la contracción gravitatoria y las fuerzas repulsivas de la materia. Cuando las energías gravitatorias de una estrella se vuelven comparables a su energía en reposo, las presiones que la materia necesita ejercer para mantenerse en equilibrio deben ser tan desorbitadas que comienzan ellas mismas a gravitar (es decir, a generar una curvatura espacio-temporal considerable). Cuando una estrella entra en este régimen, cualquier intento de permanecer en equilibrio se ve abocado al fracaso. Su destino es inevitable: colapsar para convertirse en un agujero negro.

—*Objection!* Eso de que hay un límite máximo a cómo de compacta puede ser cualquier estructura en equilibrio hidrostático es engañoso —dijo Asterio, triunfante—. Te estás apoyando en el teorema de Buchdahl, que, como todo teorema, necesita de una serie de condiciones para poder demostrarse. En concreto, que la densidad de dicha estrella sea máxima en su centro y mínima en su superficie.

—Bueno, parece una hipótesis razonable al hablar de estrellas, donde la propia

gravedad es responsable de que las capas internas sean más densas que las externas. ¿O acaso vas a contradecir este punto también?

—Solo quería recalcar que se trata de una hipótesis teórica adicional. Que se aplique a todas las estrellas que conocemos no imposibilita que haya excepciones a la norma, especialmente dado nuestro desconocimiento sobre el estado que la materia podría adoptar en situaciones extremas, tales como en un presunto agujero negro.

Pero nos estamos desviando del asunto —corrigió—. La física es una ciencia experimental, y yo no llamaría a esos argumentos verificaciones experimentales. No sé si eres consciente, pero lo que has dicho tiene una fortísima carga teórica. Has mencionado soluciones de las ecuaciones de Einstein vacías, pero que sin embargo dan lugar a una masa observable, horizontes de sucesos que son membranas de no retorno, teoremas que ponen un límite superior a la compacidad de ciertas estrellas... pero sigues sin mostrarme una prueba irrefutable de que en la constelación del Cisne hay efectivamente un agujero negro.

—El que sean agujeros negros lo que vemos reproduce muy bien las observaciones. Por ejemplo, la famosa imagen del Telescopio del Horizonte de Sucesos...

—¿Esa foto? Si solo se ven cuatro píxeles mal puestos. La existencia de estrellas ultracompactas podría explicar esas imágenes igual de bien. “Ha llegado el momento de presentarle mi teoría —pensó—, ¿me estoy emocionando?”. Por ultracompacta, me refiero a una estrella comprimida justo hasta el límite de formar un agujero negro. La diferencia principal es que, mientras que el agujero negro se caracteriza por un horizonte de eventos a partir del cual la luz no puede escapar, la estrella ultracompacta tiene superficie. Sin embargo, la gravedad en su superficie sería tan intensa que a la luz le costaría muchísimo tiempo y energía escapar, ya que su longitud de onda se vería elongada al escalar el intenso campo gravitatorio de la estrella. En consecuencia, la veríamos totalmente negra.

—Pero esos objetos no pueden existir. “Vaya, mi gozo en un pozo gravitatorio”, pensó Asterio.

—Aunque hubiese materia capaz de mantener el equilibrio hidrostático en esas situaciones —prosiguió



Nocturnio—, sabemos que una vez una estrella comienza a implosionar, nada puede parar el colapso.

“Es la primera pregunta que me suelen arrojar”, pensó Asterio. —En eso podemos estar de acuerdo. El argumento más fácil de entender es que si se produjera un colapso de una gran cantidad de materia, en el momento de cruzar el horizonte la densidad del material podría ser muy pequeña. A esas densidades es muy difícil creer que pueda haber ningún proceso que pare el colapso.

—Entonces ya está, me das la razón.

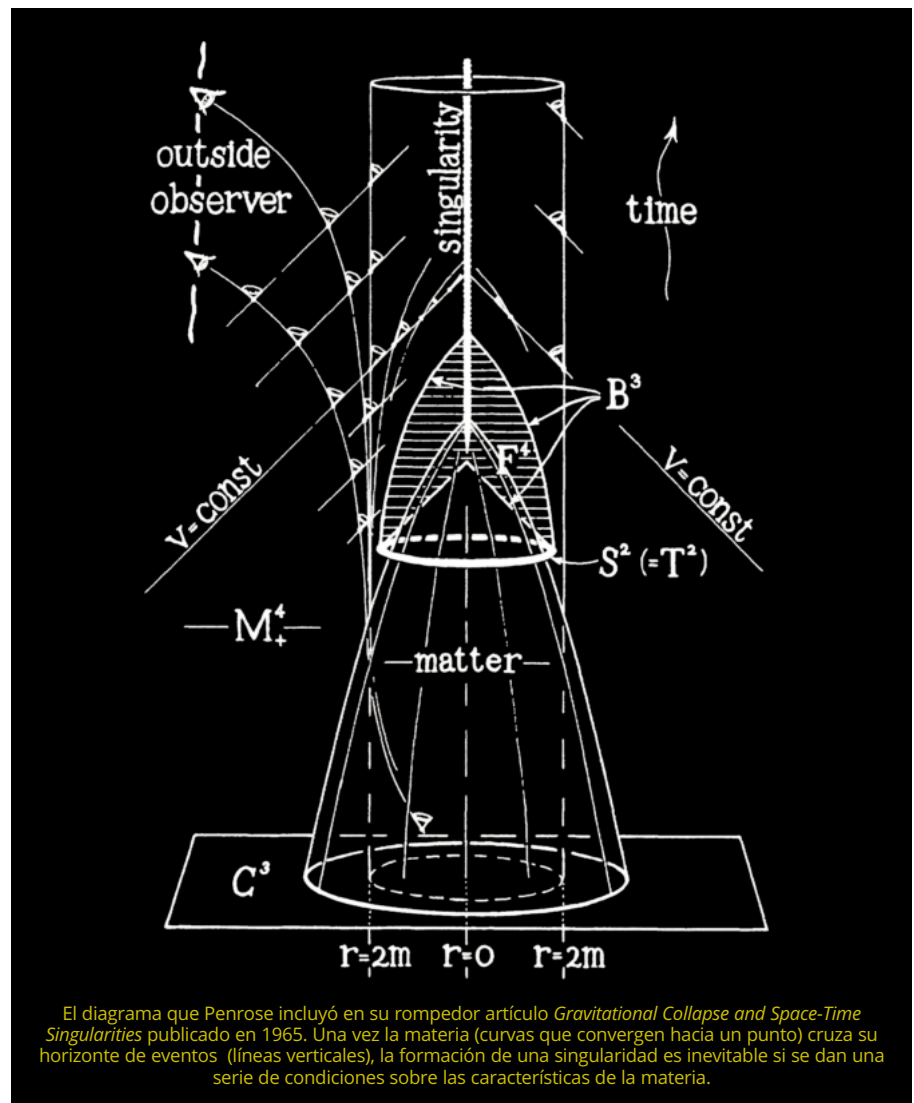
—No, solo en esto. El problema comienza una vez que se ha producido el colapso y se ha formado el horizonte externo.

—Pero si a partir de ese momento es cuando las cosas están más claras. — Comenzó a dibujar un intrincado diagrama en la tierra—. Te recuerdo que Roger Penrose, premio Nobel de física en 2020, demostró que cuando una estrella forma un horizonte no hay otra posibilidad que seguir colapsando hasta formar una singularidad. Además, él mismo formuló la conjetura de censura cósmica débil que dice que toda singularidad en relatividad general aparece escondida dentro de un horizonte. Todo apunta a que dicha conjetura es correcta, aunque no se ha llegado a una demostración. ¿Qué me estoy perdiendo entonces?

—Hay al menos tres elementos que se escapan del rango de aplicabilidad del teorema de Penrose. Trataré de explicarlos de manera física y sin recurrir a diagramas tan complicados como el que acabas de dibujar. En primer lugar, como ya sabes, la materia se comporta de distinta manera dependiendo de su densidad. Hay argumentos que apuntan a que la materia podría sufrir una transición de fase y volverse fuertemente repulsiva cuando alcanza densidades de Planck. Esta situación no se contempla dentro del teorema de Penrose, que asume que la materia se comporta como algo atractivo a todas las escalas.

»Por otro lado, la relatividad general ignora que el vacío (el estado de mínima energía de los campos cuánticos) está constituido por un mar fluctuante de partículas virtuales. Cuando este vacío físico siente la presencia de gravedad, lo normal es que reaccione generando energías de polarización.

—Por supuesto que conozco el fenómeno de la polarización del vacío, pero



se trata de un efecto muy débil.

“Le he pillado”, pensó Asterio con un leve regocijo. —En muchas situaciones es así, pero no cuando nos acercamos a situaciones tan extremas como las que se dan en un agujero negro. Del mismo modo que un electrón polariza el campo electromagnético generando una nube de carga positiva a su alrededor, la presencia de una masa (y la gravedad que ejerce) polariza el resto de campos materiales que permean nuestro universo. Si midiéramos la carga del electrón teniendo en cuenta su polarización del vacío, veríamos que es ligeramente menos negativa que el electrón desnudo. Ahora, si tenemos una estrella muy compacta que genera un campo gravitatorio intenso, este vacío reactivo tiende a contribuir vistiendo dicha estrella con una masa negativa. Las fuerzas de polarización del vacío siempre reaccionan oponiéndose a la fuente que las ha originado. Si se estimula lo suficiente, el vacío reactivo puede generar grandes

núcleos de masa negativa.

—Me cuesta imaginar que de la nada puedan emerger fuerzas capaces de contradecir los resultados de Penrose.

—Pues esto no es todo —añadió Asterio—, porque además del horizonte externo que has dibujado ahí, los agujeros negros realistas, es decir, aquellos que presentan rotación, también tienen un horizonte interno. Dicha superficie delimita la región a partir de la cual la materia no cae de forma inevitable. Como Stephen Hawking demostró, la existencia de un horizonte, en presencia de ese vacío reactivo del que hablaba antes, incita la creación de partículas.

—Esa es la famosa radiación de Hawking —intervino Nocturnio—. Si un par de partículas se crea muy cerca del horizonte, puede ocurrir que una de ellas lo cruce antes de que pueda aniquilarse con su compañera. Este efecto, visto desde muy lejos, se percibiría como una evaporación del horizonte, que tendería a encoger. Pero se conoce

que este efecto es extremadamente tenue y, a efectos prácticos, no cambia nuestra comprensión de los agujeros negros que observamos.

—Exacto, ese es actualmente el consenso al respecto. Pues bien, un horizonte interno también genera partículas, pero ahora su tendencia es a moverse hacia afuera, y no lentamente sino a un ritmo exponencial. El horizonte interno podría encontrarse y aniquilarse con el externo cuando todavía no se ha emitido casi energía al exterior. Para agujeros negros de unas pocas masas solares, esta escala sería muy rápida, de milisegundos. Así, los horizontes dejarían de existir, aunque desconocemos los detalles de cómo ocurriría.

—¿Me estás diciendo que la materia puede salir de un agujero negro? —replicó Nocturnio, incrédulo.

—Estoy diciendo que, aunque no conocemos en detalle la verdadera dinámica modificada de un colapso, parece que hay espacio para que encuentre otras formas de equilibrio.

—Ahora estoy perdido. ¿De qué me estás hablando?

—Deberías echar un vistazo al borrador que te envié hace casi un mes. “Y del que no he recibido respuesta” —dijo Asterio hacia sus adentros—. Analizando las ecuaciones de equilibrio estelar en presencia de un vacío reactivo

he encontrado soluciones que no aparecen en la relatividad general. A estas soluciones las llamamos estrellas negras, y son bolas de materia ultracompactas y oscuras que son capaces de resistir su tendencia hacia el colapso debido a los efectos repulsivos de la polarización del vacío. El vacío reactivo se resiste a que haya horizontes estáticos y reacciona generando configuraciones ultracompactas sin horizontes.

—¿Y te parecen más sencillas estas soluciones tan extrañas que los agujeros negros, los objetos más perfectos del universo? Sabes que un agujero negro tiene que ser estrictamente esférico, si no rota, o con una forma elipsoidal concreta, si rota.

—¿Y no te parece algo más propio de una idealización que de una realidad? Se ha demostrado que estos objetos ultracompactos también tienen que ser extremadamente esféricos, pero no el sentido estricto matemático. Del mismo modo que la gravedad esférica los planetas, las estrellas ultracompactas llevarían esta característica al extremo, serían esferas casi perfectas.

—Ahora que lo dices, no sería la primera vez que encontramos que la naturaleza cuántica de la materia, en este caso la del propio vacío reactivo, da lugar a nuevas fuerzas de equilibrio —claudicó Nocturnio. Ahí tienes a las

estrellas de neutrones. Me gustaría vivir para saber si los objetos ahí fuera son realmente agujeros negros o algo como lo que defiendes.

“Aunque es testarudo, Nocturnio siempre confronta mis ideas de una manera constructiva”, pensó Asterio. —Pues quizá haya suerte, ahora mismo las capacidades observacionales están aumentando por momentos. La esperanza está puesta en los nuevos observatorios de ondas gravitatorias: LIGO, Virgo, LISA, Einstein Telescope... Un aspecto que se está mirando ya en las señales es si tienen o no ecos de ondas gravitatorias, cuya presencia podría estar asociada a la existencia de una superficie.

—Me adhiero a lo que una vez me dijo Clifford Will —apuntilló Nocturnio—, el mayor especialista mundial en tests de la relatividad general: “No espero ver ninguna modificación de la relatividad general hasta que quizá exploremos el mundo de la gravedad cuántica”.

—Me inclino más por lo que decía Max Planck: “La ciencia avanza funeral a funeral”.

“Espero que, por lo menos, se lea el paper...”, pensó Asterio, afligido.

Enfrascados en su encendido diálogo, los investigadores no se percataron de cómo un astro dejaba de brillar en la bóveda celeste.

## SO-IAA. Objetivo final: ¡terminar con un nuevo comienzo!

**HACE ALGO MÁS DE UN AÑO HACÍAMOS BALANCE DE LA ÚLTIMA FASE DE NUESTRO PRIMER PROYECTO SEVERO OCHOA, Y PRESENTÁBAMOS AL PERSONAL INCORPORADO DESDE EL AÑO PREVIO GRACIAS A LOS FONDOS DE DICHO PROGRAMA DE EXCELENCIA. LA PRIMERA ACREDITACIÓN DEL IAA COMO CENTRO DE EXCELENCIA SEVERO OCHOA FINALIZABA CON EL ÚLTIMO DÍA DE 2022**

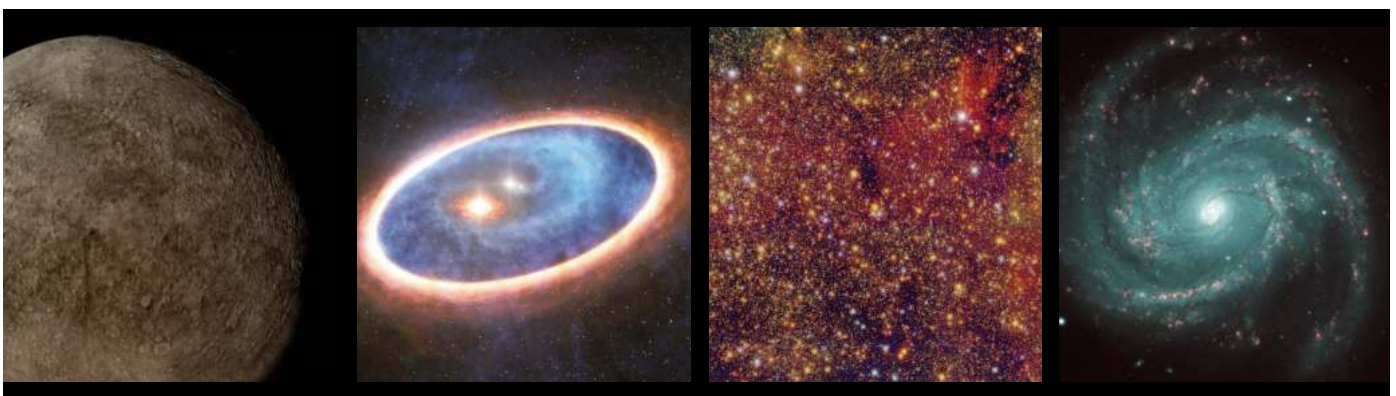
Isabel Márquez, Directora Científica Severo Ochoa IAA  
Antxon Alberdi, Director IAA-CSIC

**ENTRE LOS RESULTADOS RELEVANTES QUE LIDERAMOS EN 2022** sobre la comprensión de los sistemas planetarios, destacamos la mejor caracterización física hasta la fecha del objeto transneptuniano Huya, la prueba de la existencia de abundantes planetas extrasolares compuestos de hielo y roca alrededor de estrellas enanas, la detección de dos planetas telúricos orbitando la estrella cercana HD 260655 y la observación del material primordial que puede estar dando lugar a tres sistemas planetarios alrededor de la estrella binaria SVS 13, aún embrionaria. En el estudio de la formación estelar en la Vía Láctea y el Universo Local, analizamos la variabilidad de la nebulosa planetaria IC4997, contribuimos a comprender cómo viajan

los rayos cósmicos estudiando el papel de los halos de rayos gamma alrededor de los púlsares y desvelamos la historia de la formación estelar en el centro de nuestra Galaxia; tuvimos un papel fundamental en la obtención de imágenes de Sagitario A\* con el EHT, liderando los grupos de trabajo de imagen y *scattering* (dispersión) dentro de la colaboración, lo que confirmó la existencia del agujero negro supermasivo en el centro de la Vía Láctea y ayudó a comprender a estos “monstruos” gravitatorios; también demostramos que el flujo de materia que rodea a este agujero negro (o un posible chorro) puede estar apuntando hacia la Tierra. Desde el punto de vista teórico, demostramos que algunos de los objetos clasificados como agujeros negros pueden ser

en realidad estrellas ultracompactas. También lideramos una serie de resultados sobre evolución de galaxias y cosmología, con especial atención a las galaxias activas: pudimos rastrear las regiones centrales de la galaxia OJ287 combinando observaciones de radiotelescopios espaciales y terrestres, y estudiar en profundidad una muestra de LINERs, el tipo menos luminoso de galaxia activa, demostrando que la mitad de los LINERs producen *outflows* (supervientos) de gas ionizado. Hemos participado en el sondeo miniJPAS, un sondeo de un grado cuadrado del campo AEGIS realizado con la cámara *pathfinder* de JPCam, un anticipo del potencial científico del muestreo JPAS que ha arrancado en 2023.

Se avanzó también en nuestros proyectos tecnológicos. En relación a investigación espacial, se lanzó la misión *Sunrise III* el 10 de julio con los instrumentos Tumag y SCIP a bordo, si bien la misión tuvo que abortarse en el mismo momento del lanzamiento debido a un problema con la góndola. Para la misión *JUICE*, cuyo lanzamiento se produjo en abril de 2023, se prestó apoyo técnico a los instrumentos JANUS y GALA a nivel de la nave espacial. En enero, la misión *PLATO* de la ESA recibió luz verde para continuar su desarrollo tras superar con éxito la revisión crítica. UDIT también contribuyó a la instrumentación de *Comet Interceptor*, *EnVision* y *Vigil*. En cuanto al Observatorio de Calar Alto (CAHA), se comenzó la construcción del nuevo







instrumento TARSIS. Además, el IAA continuó con su participación en las infraestructuras ESFRI en astronomía (CTAO, ELT, EST, SKAO), así como en su instrumentación.

Todas nuestras investigaciones produjeron casi cuatrocientas publicaciones en revistas científicas de impacto, más de un tercio de ellas lideradas por personal del IAA. Son una buena representación de los numerosos proyectos en los que participamos, como CALIFA, CARMENES, TESS, EHT, J-PLUS, GALACTICNUCLEUS, GAIA, SOLAR ORBITER, Mars Express, ExoMars, IPHAS, MEGARA, LeMMINGs, *pathfinders* y precursores de SKAO.

En lo que respecta a nuestro prototipo español de Centro Regional de SKAO (SPSRC de las siglas en inglés), proporcionó servicio y asesoramiento a más de veinte proyectos de investigación en 2022, incluidos aquellos con precursores y *pathfinders* de SKAO (MeerKAT, GMRT, e-MERLIN, LOFAR, JVLA, EVN, WSRT/Apertif) pero también a otros proyectos (fotometría diferencial de estrellas, propiedades de la corona solar con *SOHO* y *Solar Orbiter*, o simulaciones meteorológicas exoespaciales, entre otros). El equipo del SPSRC también organizó diversas actividades de forma-

ción. El equipo liderado por el IAA participó en el *2nd SKA Data Challenge* con el apoyo del SPSRC; el equipo del IAA alcanzó la quinta posición (entre cuarenta), y fue el único que recibió el *Golden Reproducibility Award* por ofrecer una solución que contenía varios ejemplos de buenas prácticas en Ciencia Abierta. El equipo del SPSRC también organizó un foro de debate sobre Inteligencia Artificial y participó en el Hub del CSIC sobre este tema.

En 2022 continuamos con nuestro programa de coloquios (presenciales o virtuales o web-loquios), con unas treinta charlas de alto nivel, que fueron seguidas por personal investigador también de otras instituciones de España y del extranjero. Nuestro programa de visitas SO-IAA recuperó casi los niveles prepandémicos, con una decena de visitas al IAA-CSIC. Entre las actividades de formación del SO-IAA, destacó la Escuela Científica Avanzada sobre Evolución de Galaxias, que completó las escuelas científicas avanzadas dedicadas a los pilares del Plan Estratégico, y los módulos finales de nuestra Escuela Avanzada de Instrumentación del SO. En total, casi treinta profesores y doscientos estudiantes participaron en todas las actividades de formación SO-IAA durante 2022.

También reforzamos nuestras acciones de captación de estudiantes de máster a través del programa JAE-intro SOMM, gracias al cual acogimos a doce estudiantes de máster que en 2022 iniciaron o terminaron sus proyectos en los correspondientes campos de investigación del SO-IAA.

En julio de 2022 celebramos nuestra Conferencia anual SO-IAA, y en octubre tuvimos el mayor evento del SO, la Reunión Internacional Severo Ochoa del IAA. Bajo el título *Abordando cuestiones astrofísicas clave desde Granada*, reunió a ponentes de los web-loquios y a investigadores e investigadoras de renombre internacional, con el objetivo de promover debates en profundidad con el personal científico del IAA sobre cuestiones candentes de la astrofísica actual que habrán de abordarse en los próximos años.

Entre las actividades de nuestro programa de género, organizamos el curso *Análisis de sexo y género en la investigación y la innovación*, la exposición de *Astrónomas* en el Ayuntamiento y el Parque de las Ciencias de Granada, una mesa redonda con centros de secundaria (11F), el espectáculo teatral *Entre sillas* (8M), y la aportación *Astronomía, cuestión de mujeres* en la Escuela de Verano de la Universidad de Almería. En cuanto a divulgación, destacamos la coorganización de un gran evento junto con el Observatorio CTA (CTAO), *El Universo que veremos*, mesa redonda que reunió a los máximos responsables de tres de las mayores infraestructuras astronómicas de la Tierra: el *Cherenkov Telescope Array Observatory* (CTAO), el *Extremely Large Telescope* (ELT) y el *Square Kilometre Array Observatory* (SKAO). La naturaleza de estas instalaciones, que abrirán nuevas ventanas al cosmos en radioastronomía, rayos gamma e infrarrojo cercano y óptico, implica una importante colaboración internacional y se enfrentan a retos tecnológicos sin precedentes. La sesión abordó el estado actual de CTAO, SKAO y ELT, las novedades que aportarán a la comunidad científica y sus retos tecnológicos, energéticos y sociales. La exposición *Perspectivas* se instaló en los locales del IAA.

Entre nuestras actividades dentro de la Alianza de centros Severo Ochoa y unidades María de Maetzu (SOMMa), coorganizamos y acogimos en el IAA-CSIC la *Segunda Reunión de Gestores de Proyectos SOMMa*. Participamos activa-





mente en el encuentro *100xCiencia.6. Ciencia para el futuro: Construyendo un horizonte más justo y sostenible*, organizado por el BSC, celebrado en Barcelona en noviembre. En la subsiguiente Asamblea General de SOMMa se propuso a I. Márquez como Vicepresidenta

segunda de la Alianza. A principios de noviembre supimos que nuestra nueva propuesta para la acreditación de Excelencia Severo Ochoa, 2023-2026, estaba en la selección provisional. En diciembre de 2022 el IAA estaba seleccionado definitivamente para su

segunda acreditación Severo Ochoa, excelente noticia y gran reconocimiento para nuestro centro. El informe del Comité Internacional de Evaluación se refería al IAA como “un sólido instituto de investigación que abarca todos los campos de la astrofísica, desde el sistema





solar hasta la cosmología. Su producción científica es excelente [...]. El IAA ha utilizado el proyecto SO en el periodo 2018-2022 para ampliar y consolidar su excelencia y competitividad internacional. El plan estratégico para 2023-2026 se centra en la experiencia y los avances logrados en el periodo anterior y se beneficia de ellos. Es muy adecuado para la proyección futura del instituto, consolidando su perfil y corrigiendo algunas de las debilidades. Las diversas actividades están bien planificadas y cuidadosamente diseñadas para aprovechar los conocimientos actuales y garantizar el éxito futuro. Las cuestiones de género ocupan un lugar destacado, y se hace hincapié en la formación del personal más joven en el contexto de la investigación de alto impacto”.

No cabe duda de que el primer Severo Ochoa 2018-2022 ha supuesto un gran salto cualitativo en la vida científico-técnica del centro en muchos aspectos, atrayendo talento internacional, incrementando la producción científica, reforzando nuestra participación en proyectos instrumentales asociados a misiones espaciales e infraestructuras terrestres internacionales, generando un programa de formación competitivo y consolidando nuestra excelencia internacional. Un gran logro que fue posible gracias al esfuerzo, compromiso, ilusión y trabajo en equipo del personal científico, tecnológico y administrativo del IAA. Un viaje de cuatro años y medio en el que cumplimos nuestro objetivo final: ¡terminar con un nuevo comienzo!

La consecución de una segunda acreditación para 2023-2026 nos posiciona para llevar al instituto más lejos en excelencia. Nuestro nuevo Plan Estratégico para 2023-2026 priorizará las actividades científicas y tecnológicas en tres líneas estratégicas: a) Sistemas planetarios, atmósferas e interacciones estrella-planeta; b) Acricción, formación estelar y entorno como motores de la evolución de las galaxias; c) Instrumentación e instalaciones astronómicas de última generación. Reforzaremos nuestro liderazgo internacional apoyando estas tres líneas estratégicas mediante la contratación de personal con talento, fomentando las sinergias e interacciones entre los grupos del IAA y con grupos externos de otros institutos de investigación punteros, y complementando la financiación para el desarrollo instrumental y tecnológico. Las actividades de fertilización cruzada dentro de las tres líneas estratégicas serán fundamentales. Consolidaremos y ampliaremos tanto los programas SO-IAA de formación y género, como nuestro compromiso con la Ciencia Abierta y los principios FAIR, y consolidaremos nuestra Oficina Técnica SO-IAA.

Durante estos primeros meses, hemos puesto en marcha el nuevo programa, con una Oficina Técnica reforzada, hemos definido la estructura de gobernanza, hemos seleccionado los proyectos que constituirán las diez tesis doctorales financiadas como FPI del programa, y hemos relanzado el programa de coloquios y visitas. Hemos seleccionado además las líneas que el Severo Ochoa considera necesario

apoyar este año con contratación de personal postdoctoral y tecnológico.

El objetivo último del programa de Excelencia Severo Ochoa es atraer y alimentar el talento científico y promover una investigación competitiva internacionalmente, siguiendo los principios de excelencia, integridad, revisión externa por pares y cooperación internacional. Nos espera un nuevo periodo de ilusión y trabajo, de demostrar nuestra excelencia y nuestra capacidad de liderazgo, en el que la contribución de todas y cada una de las personas que hacen instituto es necesaria y bienvenida. Y cuyos logros queremos contar a la ciudadanía, en nuestro permanente empeño de contribuir a la difusión de la ciencia. En esa línea, organizamos junto con IMAGUGR la séptima edición del evento de comunicación de la Alianza SOMMa, el *100xciencia.7. 7 preguntas para cambiar el mundo; el estado del arte de la ciencia del futuro*, que se celebrará en el Parque de las Ciencias en octubre próximo. El contenido del evento se articula alrededor de siete preguntas: ¿cómo de habitable será la Tierra?, ¿cuánto tiempo viviremos?, ¿cómo alimentamos a diez mil millones de personas?, ¿qué tecnologías marcarán nuestra sociedad del futuro?, ¿cómo evolucionará nuestra sociedad?, ¿cuáles serán las fuentes de energía?, ¿qué nos deparará el cosmos? La línea vertebradora es la ciencia que tendremos en una o dos décadas, el *state of the art* de la ciencia del futuro. Lo del *art* va a ser importante, ya que el evento estará salpicado con actuaciones artísticas. Será un auténtico lujo contar con vuestra compañía, ¡la mejor!



# EL MOBY DICK DE...

... LAURA HERMOSA MUÑOZ (CAB, INTA-CSIC)

## GALAXIA DE ANDRÓMEDA

Yo no sabía que la astrofísica se podía estudiar. Suena raro, lo sé. En mi cabeza de niña, todo lo que se podía aprender del cielo era mirándolo a simple vista o con telescopios usando los propios ojos, y poco más. El cielo nocturno me fascinaba, las noches de verano despejadas me las pasaba mirando para arriba. Así acabé aprendiendo las constelaciones y a guiarme por el cielo junto con la ayuda de mi madre. Aprendí muchas cosas de mi madre, y muchas otras por mi cuenta viendo series como *Cosmos* (sé que ya parece un tópico, pero es la verdad). Así descubrí por primera vez a simple vista a la galaxia de Andrómeda. Resultó que había muchas más galaxias aparte de Andrómeda, pero que esta es la más grande que tenemos en nuestro entorno. Con el tiempo aprendí que las galaxias y demás objetos las estudiaban los astrofísicos, que trabajan en estudiar el universo, y no sabéis la ilusión que me hizo. Parecía que había una forma de poder entender todo aquello que había ahí arriba. Hice el grado en física porque quería conseguir ser astrofísica, lo que veía como un sueño. La verdad es que no pensaba demasiado en la dificultad que acarrearía la universidad, yo solo quería llegar ahí. Y entonces encontré el máster de astrofísica en la Universidad de La Laguna y todo cambió. Se me abrieron los ojos al poder descubrir, literalmente, todo el universo.

La primera vez que vi el cielo nocturno desde el Teide, se me pusieron los pelos de punta. El cielo al que yo había mirado en las noches de verano era infinitamente más rico y profundo. Se me hacía casi imposible reconocer nada pese a que conocía las constelaciones... ¡había demasiadas estrellas! Pero entre cientos de miles de ellas, ahí estaba Andrómeda otra vez, como una guía para situarse, un punto de anclaje. En el máster pudimos usar los telescopios de los observatorios del Teide, en Tenerife, y del Roque de los Muchachos, en La Palma, para hacer prácticas y analizar nuestros propios datos. En una asignatura, dirigida por Ismael Pérez Fournon, nos dedicamos a observar la galaxia de Andrómeda para identificar cúmulos de estrellas, el fenómeno de su núcleo doble,



Doctora en Astrofísica por la Universidad de Granada y el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC). Actualmente trabaja como investigadora posdoctoral en el Centro de Astrobiología (INTA-CSIC). Su investigación se centra en el estudio de los núcleos activos de galaxias, en particular de los “vientos” que se producen y su efecto en la evolución de las galaxias. Participa en el proyecto de explotación de tiempo garantizado de MEGARA/GTC y de MIRI/JWST.

entre muchas otras cosas.

A mi grupo nos tocaba analizar imágenes de una zona de Andrómeda para compararla con otras imágenes de épocas anteriores y en otras frecuencias. Ese día de 2018 en clase descubrimos un puntito en nuestros datos que en otras imágenes no estaba. Nos volvimos un poco locas, no sabíamos qué era, si era un fallo del detector, de la reducción de datos, un cometa, un objeto no registrado o qué. Ismael nos ayudó a descubrir que, en realidad, aquel puntito era una nova, un fenómeno recurrente que ocurre

en galaxias como Andrómeda. Pero aquella fue la primera vez que sentí que podía no solo maravillarme con la astronomía, sino también que podía ser útil y aportar cosas nuevas. Hace menos de un año me encontré a Ismael de nuevo. Me dijo que a raíz de todo aquello, había cambiado la orientación de la asignatura hacia descubrir y caracterizar novae recurrentes en Andrómeda.

Después de aquello han venido muchos datos nuevos, muchas técnicas nuevas más complicadas que la imagen, miles de cosas interesantes. También descubrí que lo de



Imagen: Juan Rodrigo González Fernández.

en ciertas estrellas en sistemas binarios. Básicamente una de las estrellas está absorbiendo material de su estrella compañera hasta llegar a una masa crítica en la que expulsa parte de esas capas externas, pero sin llegar a “morir” como ocurre cuando se produce una supernova.

Así que habíamos descubierto una nova en Andrómeda. Tras hacer las medidas oportunas nos dimos cuenta de que era la más brillante detectada ese año en Andrómeda. Hicimos hasta una nota de prensa con el descubrimiento: “Alumnos de la ULL descubren la nova más brillante de Andrómeda”. ¿Sabéis lo que supuso eso para mí? ¡De repente había hecho mi primer descubrimiento de algo en el cielo, y habíamos podido aportar un poquito al mundo de la astronomía!

Sé que puede parecer poca cosa, hay muchas novae explotando constantemente

saber interpretar el cielo a simple vista no lo sabe hacer todo el mundo, y que muchos astrofísicos profesionales por desgracia nunca han mirado ni siquiera por un telescopio *amateur*. Yo sigo siendo capaz de reconocer Andrómeda en el cielo, y me encanta enseñar cómo se observa. A pesar de lo grande que es y lo cerca que está, no es fácil de ver con nuestros ojos, y por supuesto no se puede distinguir desde todos los sitios por culpa de la contaminación lumínica. Dentro de unos cuantos miles de millones de años, Andrómeda y nuestra galaxia, la Vía Láctea, se fusionarán para formar un nuevo objeto al que se llamará Milkdrómeda. Aunque a la Tierra no le pasará nada, nuestro cielo estará cubierto de la maraña cósmica que ocurre cuando dos galaxias tan grandes interaccionan. Un digno final para las dos galaxias que más han marcado mi comienzo en astrofísica.



# DART

## LA MISIÓN QUE CAMBIÓ EL CURSO DE UN ASTEROIDE

**El impacto de la misión DART excavó más de cinco millones de kilos de material en el asteroide Dimorfo. El Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) participa en el estudio del material que expulsó el impacto, que alteró la órbita del asteroide en torno a su compañero Dídimo y produjo un cráter**

### EL MÉTODO DEL IMPACTO CINÉTICO

El 27 de septiembre de 2022, la misión DART (NASA) colisionó contra su objetivo, el asteroide Dimorfo, y cambió su órbita. Se trataba de la primera misión de prueba de defensa planetaria diseñada para cambiar el curso de un asteroide, y su éxito fue seguido por el análisis intensivo de la colisión, que incluye el estudio de las toneladas de roca que fueron desplazadas y lanzadas al espacio. Los resultados de este análisis se han publicado en varios artículos, que cuentan con una destacada participación del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC).

La misión DART (acrónimo en inglés de Prueba de Redireccionamiento de Asteroide Doble) buscaba demostrar la utilidad del método de impacto cinético para desviar asteroides potencialmente peligrosos sin emplear cargas explosivas. Su objetivo, situado a once millones de kilómetros de la Tierra, era el satélite Dimorfo, de unos 160 metros de diámetro, que orbita en torno al asteroide Dídimo (de 780 metros de diámetro), formando un sistema binario. El impacto de la nave, que viajaba a unos seis kilómetros por segundo, desvió la órbita de Dimorfo y acortó su periodo de traslación respecto a Dídimo en más de media hora, lo que constituyó un éxito del proyecto.



## EL MOVIMIENTO DEL MATERIAL

“Quedaban otros muchos otros aspectos por estudiar, en particular en lo que concierne a la caracterización del material eyectado tras la colisión —señala Fernando Moreno, investigador del IAA-CSIC participante en un estudio publicado en *Nature*—. Así, desde el mismo momento del impacto y hasta varios meses después, el telescopio espacial Hubble (HST) ha tomado imágenes de ese material y caracterizado su evolución. Aunque una parte del material consiste en partículas expulsadas a alta velocidad, a varios cientos de metros por segundo, y que desaparece del campo de visión de las cámaras rápidamente, hemos podido observar la componente de baja velocidad”.

En este trabajo se presenta un estudio fundamentalmente morfológico de la evolución de ese material, que ha permitido determinar la compleja interacción entre el sistema de asteroides y el polvo bajo la acción de la presión de radiación producida por la luz solar.

“Esta presión de radiación aleja las partículas micrométricas a distancias de varios miles de kilómetros en un par de días, mientras que las partículas más grandes, expulsadas a velocidades cercanas a la velocidad de escape del sistema (de unos cuarenta centímetros por segundo) muestran movimientos espirales alrededor del sistema y una complicada evolución con el paso de los días. Vemos, por ejemplo, la aparición de una cola doble, que podría estar relacionada con el reimpacto de una porción de las partículas más grandes emitidas (boulders) sobre la superficie de Dídimo, o bien con la desintegración de esos mismos boulders debido a una alta velocidad de rotación o por efecto de

colisiones mutuas”, indica Fernando Moreno (IAA-CSIC).

La activación de asteroides constituye un fenómeno que ocurre de manera natural en el Sistema Solar y que produce el aumento de brillo del objeto y el despliegue de una cola de polvo similar a la de los cometas. El experimento DART ayudará a caracterizar los asteroides activos naturales en los que las colisiones con otros asteroides actúan como mecanismo de activación. El impacto, por otra parte, habrá generado un cráter en la superficie de Dimorfo, cuyas propiedades, así como la evolución de la dinámica del sistema, serán estudiados por la misión Hera de la Agencia Espacial Europea (ESA), que será lanzada en 2024 y que comenzará el estudio del sistema en 2026.

Las observaciones de la misión DART producirán más resultados en breve. “Caracterizaremos el material eyectado con la aplicación de códigos dinámicos de Monte Carlo, que permiten estudiar la evolución dinámica de las partículas y construir imágenes sintéticas, que revelan a su vez las propiedades del polvo: distribución de tamaños, velocidades y masa total eyectada. Esto es muy importante de cara a la determinación del llamado factor beta sobre la eficiencia de la transmisión del momento lineal en la colisión, aparte del conocimiento que transmite sobre los procesos de colisión naturales en el cinturón de asteroides”, concluye Fernando Moreno (IAA-CSIC), que también colabora en un artículo en la revista *Icarus* donde se plantea que haya partículas o rocas que pueden estar siendo emitidas al espacio por la rápida rotación de Dídimo (cada 2.2 horas) y permanecer en órbita alrededor de él.

## LA COMPOSICIÓN DEL ASTEROIDE

Otro equipo, que también cuenta con la participación del IAA-CSIC, estudió cómo el impacto de DART alteró la superficie del asteroide con el telescopio *Very Large Array* (ESO).

“Cuando observamos los objetos de nuestro Sistema Solar, vemos la luz solar que se dispersa por su superficie o por su atmósfera, que se polariza parcialmente —explica Stefano Bagnulo, investigador del Observatorio y Planetario de Armagh que encabeza el trabajo—. Esto significa que las ondas de luz oscilan a lo largo de una dirección preferente, en lugar de al azar. Rastrear cómo cambia la polarización con la orientación del asteroide en relación con nosotros y con el Sol revela la estructura y composición de su superficie”.

El equipo científico de este estudio empleó el instrumento *FOcal Reducer / Low dispersion Spectrograph 2* (FORS2), instalado en el VLT, para

monitorear el asteroide. “Observamos que el nivel de polarización cayó repentinamente después del impacto y que, al mismo tiempo, el brillo general del sistema aumentó”, destaca Olga Muñoz, investigadora del IAA-CSIC que participa en el trabajo. Una posible explicación sería que el impacto expuso más material prístino del interior del asteroide. “Tal vez el material excavado por el impacto era intrínsecamente más brillante y menos polarizado que el material presente en la superficie, ya que nunca estuvo expuesto al viento ni a la radiación solares”, afirma Bagnulo.

Otra posibilidad reside en que el impacto destruyera partículas de la superficie, expulsando así otras mucho más pequeñas a la nube de escombros. Se conoce que, bajo ciertas circunstancias, los fragmentos más pequeños son más eficientes para reflejar la luz y menos eficientes para polarizarla.

# Lo que la ciencia unió y separó: vida(s) y muerte(s)

MARTA BAENA SANZ, PERIODISTA CIENTÍFICA Y COMUNICADORA AUDIOVISUAL, [MARTABAENA.WORDPRESS.COM/](http://MARTABAENA.WORDPRESS.COM/)  
SEBASTIANO DE FRANCISCIS, INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA IAA-CSIC, [LACIENCIAESABURRIDA.WORDPRESS.COM/](http://LACIENCIAESABURRIDA.WORDPRESS.COM/)

Fritz Jacob Haber y Clara Immerwahr fueron un matrimonio alemán de principios del siglo XX, ambos científicos e investigadores en química. Durante la Gran Guerra, Fritz Haber, que por aquel entonces trabajaba en un laboratorio de Dahlem (Berlín), desarrolló el gas tóxico dicloro y otros gases letales. Decidido promotor y partidario de destinarlo a fines bélicos, el 22 de abril de 1915 presentó el lanzamiento por el ejército alemán de ciento cincuenta toneladas de gas dicloro sobre un área de seis kilómetros en Ypres, al suroeste de Bélgica. Tras el ataque el panorama era dantesco: los moribundos se retorcián entre espasmos echando espumarajos amarillentos por la boca. Debido al éxito de esta terrible operación fue nombrado capitán de la Wehrmacht, obteniendo el poder de supervisar directamente las operaciones.

Fue así como el 1 de mayo de ese mismo año se organizó un festejo en la casa de los Haber por el honor concedido a él, un civil, y además judío. Clara, su esposa, pasó la tarde inquieta, escribiendo cartas, y por la noche participó en la recepción visiblemente incómoda. Ella esperó a que el último invitado se fuera y, tal vez, se despidió en silencio de su único hijo, Hermann, de trece años. Fue al jardín, probó el arma de su marido con un primer disparo y luego dirigió el segundo a su pecho, directamente a su corazón. Hermann aún la encontró con vida, pero



Clara murió un poco después.

Esta fue la carta de despedida que Fritz encontró encima de la mesa del escritorio de Clara:

**1 mayo 1915**

*Empezar esta carta es tan complicado como encontrar las palabras necesarias para que se entiendan mis motivos. Los que conozcan la tragedia podrán juzgar mañana mi acto y pensar en el motivo que lleva a una mujer que, aparentemente, lo tiene todo, a tomar una determinación así.*

*Mi motivo es el dolor. El profundo dolor que me produce ver lo que una mente brillante, como la de mi propio marido, ha sido capaz de generar para hacer el mal. La angustia tan grande que tengo de pensar en los centenares de vidas que indirectamente ha matado*

*la persona que elegí para compartir mi historia, tú. El padre de mi amado hijo.*

*Bien conocías mi pasión por la ciencia y lo duro que me resultó llegar donde llegué. Me convertí en la primera mujer que logró un doctorado en química en la Universidad de Breslavia, no sin mucho esfuerzo porque las mujeres no teníamos permitido este tipo de formación académica. Pero mi perseverancia me hizo luchar.*

*Creo en el avance, en que la ciencia ayuda a mejorar la vida de las personas, en que los científicos tendríamos que seguir un código deontológico –como el de los médicos– que nos llevara siempre a velar por el bienestar y los intereses de la sociedad. Que nuestro objetivo investigando debe estar siempre orientado hacia el progreso y la prosperidad social.*

*Pero, con el tiempo, me he dado cuenta de que la ciencia, dependiendo de quién y cómo se emplee, puede jugar también el papel inverso. El más perverso, de hecho, que podría haber imaginado jamás. Y eso me lo ha enseñado la persona a la cual más podía admirar, mi propio marido.*

*La ciencia me unió a ti, Fritz, y ahora me separa para siempre. Tu brillante carrera quedará empañada por tu implicación política. Tú, al unir química y guerra, has creado la peor arma posible: aquella que quita vidas.*

*Para mí ya no eres solo un científico. Sería hipócrita querer verte únicamente así, cuando sé la cantidad de personas que han perecido por tu gran descubrimiento. Una fórmula brillante que esperaba te reportara mucho éxito en tu carrera, lo merecías todo, pero que jamás pensé que serías capaz de usar en tu bene-*





ficio y en contra del bien común.

*Contigo me he dado cuenta de que la ciencia tiene tanto poder de sanar como de matar, y de que, dependiendo de las manos en las que caiga y de las intenciones que lleve, puede convertirse en un arma letal. Con tus actos no solo me has hecho perder la fe en ti, sino también en la ciencia. Y este sí que es un peso que no puedo soportar.*

*La ciencia nos ofrecía un universo inmenso de posibilidades, pero la elección que tú has tomado nunca debió de ser una de ellas. Y yo, sabiendo todo lo que sé de ti y del proceso investigativo, no puedo más que apartarme, porque en ningún caso seré cómplice de esta atrocidad.*

*Lo siento, sobre todo por mi hijo, Hermann, que algún día espero que lea esta carta y sepa perdonar a una científica que no encontró la manera de mirar hacia otro lado y continuar con su vida.*

Clara

Tras este terrible suceso parece ser que el capitán Haber solicitó permiso a sus superiores para acompañar a su hijo y organizar el funeral de su mujer. Sin embargo, al no obtenerlo, partió al frente la noche del 2 de mayo. Aquí viene una carta que Fritz, atormentado por sentimientos enfrentados, escribió unos días después de la trágica muerte de su esposa, desde el frente de Ypres:

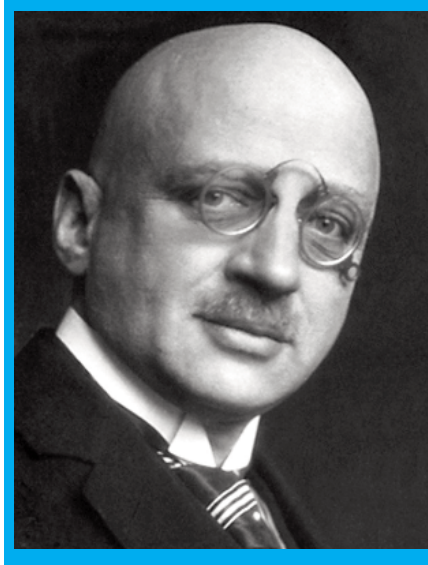
**Ypres, 24 mayo 1915**

Amada Clara,

*Aún en el frente, cumpliendo mis deberes con nuestro Pueblo y nuestro Emperador, cada vez que vuelvo al centro de comando leo, una y otra vez, tu última carta y sufro frente a lo absurdo y a lo inexplicable de tu gesto. Es cierto que tenías todo lo que la vida podía darte y te podría asegurar que en pocos meses habiésemos alcanzado el más alto y digno lugar del mundo, como merece la Civilización y el Pueblo alemán, todo.*

*Pero tu determinación obstinada, la misma que te llevó al estudio de la química, la misma que te empujó a ayudarme en mis investigaciones, con las traducciones de los artículos al alemán, la misma que te dio la fuerza de criar a nuestro hijo y hacer frente a su precario estado de salud, esa misma determinación te dirigió hacia la locura y luego a tu muerte. Tu locura ha deformado para ti los buenos, verdaderos y justos principios que rigen la labor de tu marido.*

*Mi ciencia es para el bien común, en el que tú hubieras tenido un sitio de honor a mi*



*lado, si solo hubieras cumplido con tus dignas obligaciones de esposa y madre, si esa ciega locura no te hubiese desviado de los valores del pueblo alemán al que perteneces...*

*El objetivo de mi trabajo siempre ha estado orientado al progreso y a la prosperidad del Pueblo. Gracias al proceso de síntesis del amoníaco, que desarrollé hace pocos años, en el próximo futuro habrá grandes cantidades de abono y, gracias a eso, alimentos y bienestar para todos nuestros hermanos alemanes.*

*El continuo ataque a nuestro Pueblo y a nuestra cultura por parte de unos países que ya desvirtuaron su moral y perdieron los verdaderos valores de la raza blanca europea, me obliga a defender a mi familia y a nuestro Pueblo, incluso empleando medios bélicos. Eso mismo pudiste leer en el manifiesto "An die Kulturwelt!", que firmé con mucho honor, y eso mismo te insistí y afirmé en todas las ocasiones en las que tuve que discutir contigo.*

*En estos tiempos de guerra, mi labor, mi ciencia y yo mismo pertenecemos al Imperio alemán y a su Pueblo. Mi ciencia está acelerando los acontecimientos bélicos y acortará la duración de la guerra, salvando miles y miles de vidas de los soldados del Imperio, a cambio de unas pocas de los enemigos de tu Pueblo y de tu civilización. La guerra es la guerra y la muerte es la muerte, fuera cual fuera el medio para infligirla y el medio que yo desarrollé es de los más eficaces.*

*No te perdonaré que acabases con tu vida cuando celebraba mi ascenso a capitán. No te perdonaré que mi hijo tuviera que verte desangrada en tu cobarde muerte. A pesar de mi rabia por ti, solicité, en vano, un per-*

*miso para acompañar a nuestro hijo al funeral, para asistir a tu último viaje. Probablemente haya sido mejor no haber estado en el funeral, sentía indignación y vergüenza por lo que hiciste. Podríamos haber sido felices y tú lo estropeaste con tu insensato gesto. Mi arma, aquella con la cual te mataste, una Parabellum, lleva en su nombre lo que tú no quisiste entender; ironía amarga y triste de la vida<sup>2</sup>.*

*Sigo trabajando por la victoria y la dignidad de nuestro hijo y de mi Pueblo. Mañana lanzaremos un segundo ataque en Ypres para demostrarle al mundo nuestra superioridad, bélica y moral. Una pena que tú no puedas ser testigo de semejante triunfo.*

*Con amor y rabia, tu esposo,*

Fritz

\*Ambas cartas son ficticias y tratan de recrear la que pudo haber sido la última conversación escrita entre Fritz Haber y su difunta esposa Clara Immerwahr, reflejando sus contradicciones, sus disputas morales y éticas, y la ambivalencia de una ciencia que puede dar vida y bienestar, pero también muerte y destrucción.

Fritz Haber en 1907 fue el primero en extraer nitrógeno directamente del aire, mediante el proceso de Haber-Bosch (la reacción de nitrógeno e hidrógeno gaseosos para producir amoníaco). La importancia de la reacción radica en la dificultad de producir amoníaco a un nivel industrial. De esta manera, se pudo dar solución a la escasez de fertilizantes que amenazaban con desencadenar una hambruna global como no se había visto antes. De no haber sido por él, cientos de millones de personas, que hasta entonces dependían de fertilizantes naturales para abonar sus cultivos, podrían haber muerto por falta de alimentos. Según las palabras de la prensa de su época, Fritz fue el hombre que "extrajo pan del aire".

## NOTAS

1. El "An die Kulturwelt!" es el nombre de una proclama publicada el 4 de octubre de 1914, firmada por 93 prominentes científicos, eruditos y artistas alemanes, declarando su irrevocable apoyo a las acciones militares alemanas a comienzos de la Primera Guerra Mundial. Fritz Haber fue uno de los firmantes, en el puesto 26.

2. La Parabellum-Pistole, conocida como Luger, es una pistola semiautomática patentada en 1898, y producida por Alemania a partir del año 1900. Su nombre proviene del antiguo refrán en latín *Si vis pacem, para bellum*: si quieres la paz, prepárate para la guerra.

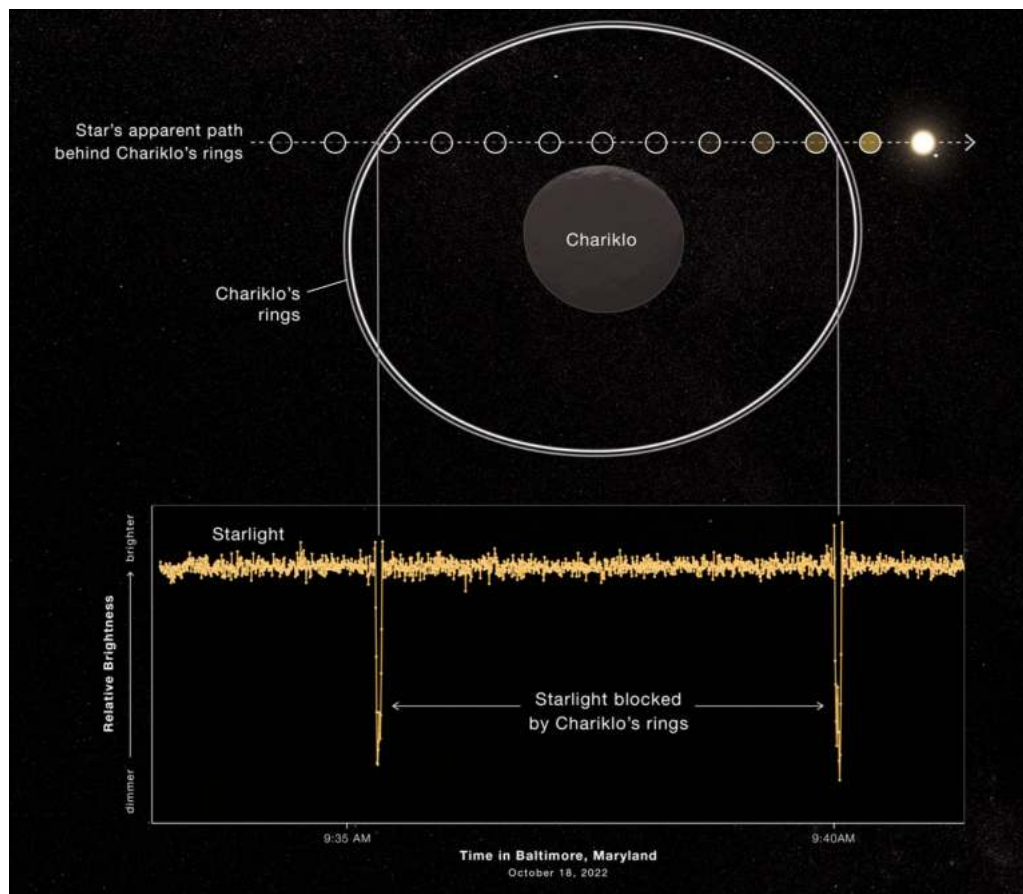
## El telescopio espacial JWST observa los anillos de Cariclo con una técnica de ocultación de alta precisión

**EL IAA-CSIC ENCABEZA UNA CAMPAÑA DE OBSERVACIÓN CON EL JWST PARA CAPTAR LAS SOMBRAS DE LA LUZ ESTELAR PRODUCIDAS POR LOS DELGADOS ANILLOS DEL OBJETO, SITUADO MÁS ALLÁ DE SATURNO**

En 2013, un equipo científico internacional observó cómo Cariclo, un planeta menor situado entre Saturno y Urano, pasaba por delante de una estrella de fondo, una técnica que se conoce como ocultación. Sorprendentemente, la estrella parpadeó dos veces antes y después de desaparecer detrás de Cariclo, lo que reveló la presencia de dos anillos finos y densos, los primeros detectados alrededor de un objeto del Sistema Solar que no fuera un planeta gigante. Los anillos han sido observados ahora por el telescopio espacial JWST, en su primera ocultación estelar observada.

“En un hito observacional de alta precisión, el 18 de octubre de 2022 pudimos observar los descensos en brillo que el paso de Cariclo produjo en la estrella Gaia DR3 6873519665992128512. Las sombras de los anillos se detectaron claramente, mostrando una nueva forma de estudiar el Sistema Solar con el James Webb”, indica Pablo Santos-Sanz, investigador del IAA-CSIC que lideró la campaña de observación.

Los anillos de Cariclo están compuestos probablemente por pequeñas partículas de hielo de agua mezcladas con material oscuro, restos de un cuerpo helado con el que colisionó en el pasado. Cariclo es demasiado pequeño y se halla demasiado lejos para que incluso el JWST pueda obtener imágenes directas de los anillos, de modo que las ocultaciones son la única herramienta para caracterizar los ani-



llos.

“A medida que profundicemos en los datos, exploraremos si resolvemos limpiamente los dos anillos. A partir de las curvas de luz de la ocultación exploraremos el grosor de los anillos, así como los tamaños y colores de las partículas que los forman. Esperamos comprender mejor por qué este pequeño cuerpo tiene anillos, y tal vez detectar otros más débiles”, añade Pablo Santos-Sanz.

Poco después de la ocultación, el JWST volvió a apuntar a Cariclo, en esta ocasión para observar la luz del Sol reflejada por Cariclo y sus anillos, que aportó un espectro con una clara presencia de hielo de agua en el sistema. “Los espectros de los telescopios terrestres habían insinuado la presencia de este hielo, pero la exquisita calidad del JWST reveló por pri-

La curva de luz de la ocultación tomada por la cámara infrarroja NIRCam del JWST muestra las caídas en el brillo de la estrella (Gaia DR3 6873519665992128512) cuando los anillos de Cariclo pasaron frente a ella el 18 de octubre. La estrella no pasó detrás de Cariclo desde el punto de vista de JWST, sino detrás de sus anillos. Cada pico corresponde a las sombras de los dos anillos alrededor de Cariclo. Crédito de la imagen: NASA, ESA, CSA, Leah Hustak (STScI). Ciencia: Pablo Santos-Sanz (IAA/CSIC), Nicolás Morales (IAA/CSIC), Bruno Morgado (UFRJ, ON/MCTI, LIneA).

mera vez la clara firma del hielo cristalino”, apunta Noemí Pinilla-Alonso, responsable de las observaciones espectroscópicas de Cariclo realizadas por el JWST. “Dado que las partículas de alta energía transforman el hielo de estado cristalino a amorfo, la detección de hielo cristalino indica que el sistema de Cariclo experimenta microcolisiones continuas que exponen el material prístino o desencadenan procesos de cristalización”, apunta Dean Hines, investigador del STSI que participa en el trabajo.

La mayor parte de la luz reflejada en el

espectro procede del propio Cariclo, y los modelos sugieren que el área del anillo observada con el JWST es unas cinco veces menor que el área del propio cuerpo. La alta sensibilidad de JWST, en combinación con modelos detallados, permitirán distinguir las firmas debidas al material de los anillos y al propio Cariclo. “Observando Cariclo con JWST durante varios años podremos aislar la contribución de los anillos a medida que cambia nuestro ángulo de visión respecto a ellos”, afirma Pinilla-Alonso (NASA).

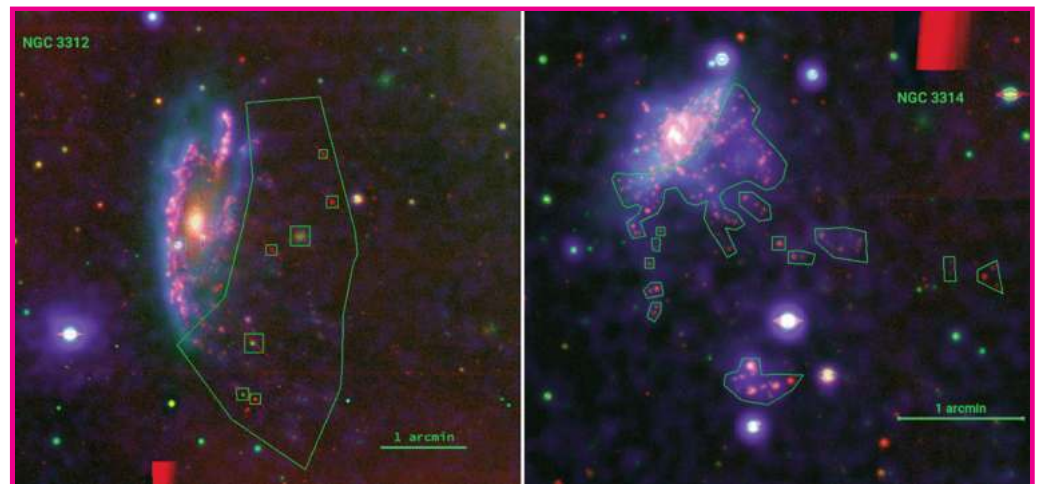


## Se hallan inesperadas colas de gas y estrellas en dos galaxias del cúmulo de Hidra

**EL IAA-CSIC ENCABEZA EL ESTUDIO DE NGC 3312 Y NGC3314A, DOS GALAXIAS EN INTERACCIÓN AVANZADA CON EL CÚMULO QUE DEBERÍAN HABER PERDIDO LA MAYOR PARTE DE SU GAS**

Los cúmulos de galaxias son agrupaciones de cientos o miles de galaxias unidas gravitatoriamente, que se desplazan dentro de él e interaccionan con el gas caliente que forma el medio intracumular. Esta interacción produce cambios en su forma y composición, siendo el más notorio la pérdida del gas de las galaxias, el hidrógeno frío a partir del que se forman las estrellas. Ahora, un estudio liderado por el IAA-CSIC ha descubierto, en las colas de arrastre de dos galaxias situadas en la región central del cúmulo de Hidra, abundancia de gas frío y estrellas en formación, algo anómalo ya que se espera que el gas se pierda por su desplazamiento hacia el centro del cúmulo.

“Este descubrimiento puede cambiar nuestra visión del campo porque los resultados sugieren que algunas galaxias pueden ser capaces de retener su gas durante más tiempo que otras, pero aún desconocemos las causas”, apunta Kelley Hess, investigadora del IAA-CSIC que encabeza el artículo. Las galaxias que se mueven a través del medio intracumular crean, de manera similar a un barco desplazándose por el agua, un “arco de choque” en el sentido en el que avanzan, dejando atrás una estela de material erosionado. “De esta forma se distorsiona el contenido de gas de la galaxia y, en última instancia, este proceso puede eliminar todo el gas frío”, explica Hess (IAA-CSIC).



Imágenes de NGC 3314 y NGC 3312 donde se marcan las regiones empleadas para calcular la tasa de formación estelar en las colas de material. Debajo, el cúmulo de Hidra (crédito: Steven Mohr).

El cúmulo de Hidra, que agrupa más de ciento cincuenta galaxias brillantes, es uno de los mayores cúmulos de galaxias cercanos y muestra en sus regiones centrales dos galaxias espirales, NGC 3312 y NGC 3314a, que constituyen las galaxias espirales más próximas al centro de un cúmulo en las que se han visto tan bien definidas colas de marea de gran tamaño: de hecho, el estudio calcula que el material arrancado que conforma las colas equivale a un 8% y un 35% del gas total de los discos, y muestra que aún continúa formando estrellas. La formación estelar suele asociarse a los brazos de las galaxias, pero curiosamente estas colas albergan una cantidad notable de estrellas en formación: estrellas que probablemente vivirán toda su vida dentro del cúmulo, pero fuera de una galaxia.

### La constitución de los cúmulos de galaxias

Las galaxias pueden unirse a un cúmulo individualmente o en grupo. En este último caso, pueden formar subestructuras capaces de sobrevivir dentro del cúmulo, tal y como se ha hallado en la región central del cúmulo



de Hidra: el arrastre observado en las colas de NGC 3312 y NGC 3314a revela que se mueven hacia nosotros como parte de una subestructura que ya ha superado su punto de máxima aproximación al centro del cúmulo. El hecho de que estas galaxias posean aún un alto contenido en gas frío sugiere que o bien el medio de la subestructura podría protegerlas de los efectos más dramáticos de la presión de arrastre, o bien que las galaxias se mueven en órbitas más tangenciales de las que se suponían en un principio. En líneas generales, el estudio

avanza en la comprensión de cómo afecta a las galaxias el entorno en el que viven. “Creo que la idea de que las galaxias no son meros objetos aislados que viven tranquilamente su vida, sino que viven en entornos dinámicos, es algo asombroso en lo que pensar –concluye Hess (IAA-CSIC)–. El estudio de la evolución de las galaxias y del papel que desempeña el entorno se compara a menudo con el estudio de la ‘naturaleza frente a la crianza’ en psicología. Este es un caso de estudio sobre el fuerte impacto que puede tener la ‘crianza’ en la evolución de una galaxia”.

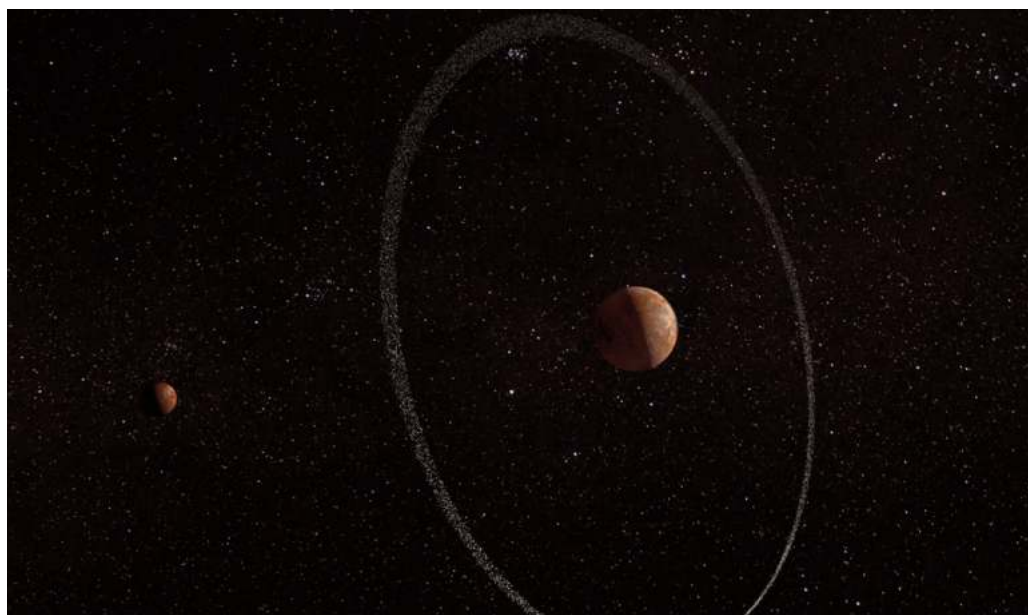
## El objeto transneptuniano Quaoar muestra un anillo que cuestiona una teoría vigente desde 1850

**EL IAA-CSIC PARTICIPA EN EL HALLAZGO DE UN DENSO ANILLO EN ESTE OBJETO QUE, CON UN TAMAÑO EQUIVALENTE A LA MITAD DE PLUTÓN, PLANTEA VARIOS PROBLEMAS**

Hasta 2013 solo se conocían anillos alrededor de los planetas gigantes del Sistema Solar, lo que cambió con los descubrimientos de anillos alrededor del objeto centauro Cariclo (2013), y del objeto transneptuniano (TNO) Haumea (2017). Ahora, el hallazgo de un anillo alrededor del transneptuniano Quaoar complica el escenario, ya que su anillo se halla mucho más allá del límite de Roche, lo que desafía la teoría aceptada de a qué distancia deben acumularse los fragmentos de polvo y hielo que forman los anillos. El trabajo, publicado en *Nature*, es fruto de una colaboración internacional enmarcada en el proyecto europeo *ERC Advanced Grant Lucky Star*.

Quaoar es un gran objeto transneptuniano que muestra aproximadamente la mitad del tamaño de Plutón y que orbita a cuarenta y tres unidades astronómicas del Sol (o cuarenta y tres veces la distancia entre la Tierra y el Sol). Una propiedad única y sorprendente del anillo es su gran radio que, con 4100 kilómetros, corresponde a unos 7.4 radios de Quaoar.

Esto se halla mucho más allá del límite de Roche, la distancia a la que, según la teoría desarrollada por Edouard Roche alrededor de 1850, las fuerzas de marea del cuerpo central impiden que las partículas se agreguen en un satélite. Según esta teoría, un anillo de colisión dentro de este límite no puede acumularse, mientras que fuera de este límite se espera que las partículas se agreguen y se forme un satélite en



escalas de tiempo de solo semanas. Y hasta ahora esto era lo que se había observado: todos los anillos densos de los cuatro planetas gigantes, así como los anillos de Cariclo y Haumea, se encuentran efectivamente dentro o cerca del límite de Roche de sus respectivos cuerpos. En cambio, el anillo de Quaoar ocupa una órbita donde debería haberse formado un satélite.

“Cuando por primera vez vimos la posible existencia de un anillo fuera del límite de Roche en los excelentes datos obtenidos con el Gran Telescopio Canarias nos dimos cuenta de que podríamos tardar bastantes años en probar de forma contundente esta circunstancia, pero finalmente lo conseguimos en unos pocos años gracias a un importante esfuerzo internacional”, destaca José Luis Ortiz, investigador del IAA-CSIC que participa en el trabajo.

El descubrimiento del anillo de Quaoar desencadenó numerosos estudios numéricos, y se desarrollaron simulaciones locales de autogravitación. Mientras que las leyes de colisión utilizadas clásicamente para describir los

anillos de Saturno dieron como resultado acumulaciones rápidas, que si favorecerían la formación de un satélite en esa región, las leyes de colisión más elásticas obtenidas en el laboratorio a bajas temperaturas mostraron lo contrario: las velocidades posteriores al impacto entre las partículas permanecen lo suficientemente altas como para escapar de las atracciones de las demás y, finalmente, superar su tendencia a acumularse. Por lo tanto, mientras que el criterio de Roche parece sólido para explicar cómo las fuerzas de marea interrumpen la formación de un satélite para formar un anillo, el proceso contrario, la acumulación de partículas en un satélite, implica mecanismos más complejos que hasta ahora se han pasado por alto.

Sin embargo, aún persisten incógnitas en relación a este pequeño objeto. “Curiosamente, el anillo se encuentra a una distancia de Quaoar en la que las partículas que lo forman tardan en dar una vuelta alrededor de Quaoar justo tres veces más tiempo de lo que tarda Quaoar en dar un giro sobre sí

mismo. Se trata de un fenómeno que ya observamos antes en el planeta enano Haumea y creemos que ocurre también en Cariclo, por lo que parece existir un patrón común en la formación de anillos densos”, concluye José Luis Ortiz (IAA-CSIC).

El hallazgo de anillos en objetos tan pequeños y distantes del Sistema Solar se realiza utilizando el método de ocultación estelar, que consiste en observar objetos que transitan por delante de las estrellas de fondo. Los anillos de Cariclo y Haumea implicaban que los anillos debían ser comunes entre los pequeños objetos del Sistema Solar exterior, y su búsqueda era uno de los objetivos principales del proyecto *Lucky Star*, liderado por Bruno Sicardy (Observatorio de París). El descubrimiento del anillo de Quaoar surgió de la combinación de ocultaciones estelares observadas entre 2018 y 2021 desde un telescopio robótico en Namibia (proyecto HESS), el Gran Telescopio Canarias (La Palma), el telescopio espacial CHEOPS (ESA) y estaciones de aficionados australianas en la región de Brisbane.



## El instrumento CARMENES multiplica el número de planetas conocidos en la vecindad solar

**EL INSTRUMENTO, CODESARROLLADO POR EL IAA-CSIC, HA PERMITIDO DESCUBRIR 59 PLANETAS, ALGUNOS EN LA ZONA DE HABITABILIDAD**

El consorcio del proyecto CARMENES ha publicado los datos correspondientes a unas veinte mil observaciones tomadas entre 2016 y 2020, de una muestra de 362 estrellas frías cercanas. El instrumento, que opera desde el telescopio de 3.5 metros del Observatorio de Calar Alto, se centra en la búsqueda de exoplanetas similares a la Tierra (rocosos y templados) con posibilidad de albergar agua líquida en superficie si se hallan en la zona de habitabilidad de su estrella. Entre la multitud de datos liberada destacan los que han permitido el descubrimiento de 59 exoplanetas, una decena de ellos potencialmente habitables.

“CARMENES ha reanalizado diecisiete planetas conocidos y ha descubierto y confirmado 59 nuevos planetas en la vecindad de nuestro Sistema Solar, contribuyendo notablemente a ampliar el censo de exoplanetas próximos”, señala Ignasi Ribas, investigador del IEEC-CSIC que encabeza el artículo.

De hecho, este instrumento ha multiplicado el número de exoplanetas que conocemos alrededor de estrellas frías cercanas. Esta primera liberación de datos permitirá su uso en abierto a la comunidad científica internacional, lo que incrementará la producción científica de CARMENES, que ha observado prácticamente la mitad de todas las estrellas pequeñas cercanas (una parte de ellas solo puede observarse desde el hemisferio sur). Además, los espectros obtenidos proporcionan tam-

bién información de gran valor sobre las atmósferas de las estrellas y sus planetas.

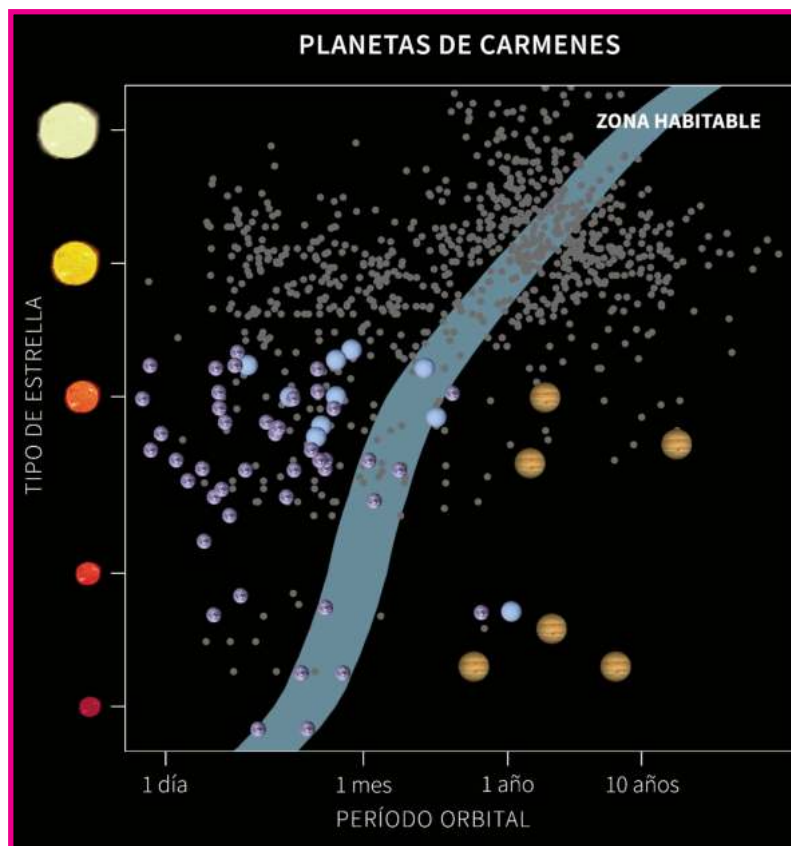
El artículo, publicado en *Astronomy & Astrophysics* es, precisamente, el número cien del consorcio CARMENES, lo que muestra el éxito del proyecto. En este estudio se han liberado los datos correspondientes a la información obtenida en luz visible, y en el futuro tendrá lugar una segunda liberación de datos con las medidas en el infrarrojo.

El proyecto CARMENES continúa a través de *CARMENES Legacy-Plus*. Coliderado por el IAA-CSIC y el ICE-CSIC, se trata de la continuación natural y la ampliación de las exitosas observaciones con el instrumento, que han acumulado casi ochocientas noches útiles de observación durante cinco años. Está pensado como un monitoreo exhaustivo para detectar y caracterizar sus exoplanetas durante trescientas noches.

“Además del proyecto científico, desde el IAA-CSIC, y en estrecha colaboración con los técnicos e ingenieros del Observatorio de Calar Alto, estamos desarrollando una mejora técnica para dotar de más precisión a todo el instrumento, y en particular al canal infrarrojo. Denominado CARMENES-PLUS, este proyecto instrumental permitirá mantener la alta competitividad de CARMENES, no solo ampliando su búsqueda de planetas rocosos sino también permitiendo la caracterización de sus posibles atmósferas, que constituye el siguiente reto observacional en el campo”, destaca Pedro J. Amado, investigador del IAA-CSIC que coordinó el desarrollo del brazo infrarrojo de CARMENES y que encabeza CARMENES-PLUS.

### Un instrumento único

CARMENES emplea la técnica de velocidad radial, que busca diminutas



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

oscilaciones en el movimiento de las estrellas generadas por la atracción de los planetas que giran a su alrededor. Y lo hace en torno a estrellas enanas rojas (o enanas M), más pequeñas que nuestro Sol, que ofrecen las condiciones para la existencia de agua líquida en órbitas cercanas y en las que, a diferencia de las de tipo solar, podemos detectar las oscilaciones producidas por planetas similares al nuestro con la tecnología actual.

CARMENES es un instrumento único

en el mundo, tanto en precisión como en estabilidad, cualidades indispensables para medir las pequeñas variaciones de velocidad que un planeta produce en las estrellas: CARMENES detecta variaciones de velocidad en el movimiento de estrellas situadas a cientos de billones de kilómetros con una precisión del orden de un metro por segundo. Para ello, trabaja en condiciones de vacío y con temperaturas controladas hasta la milésima de grado.

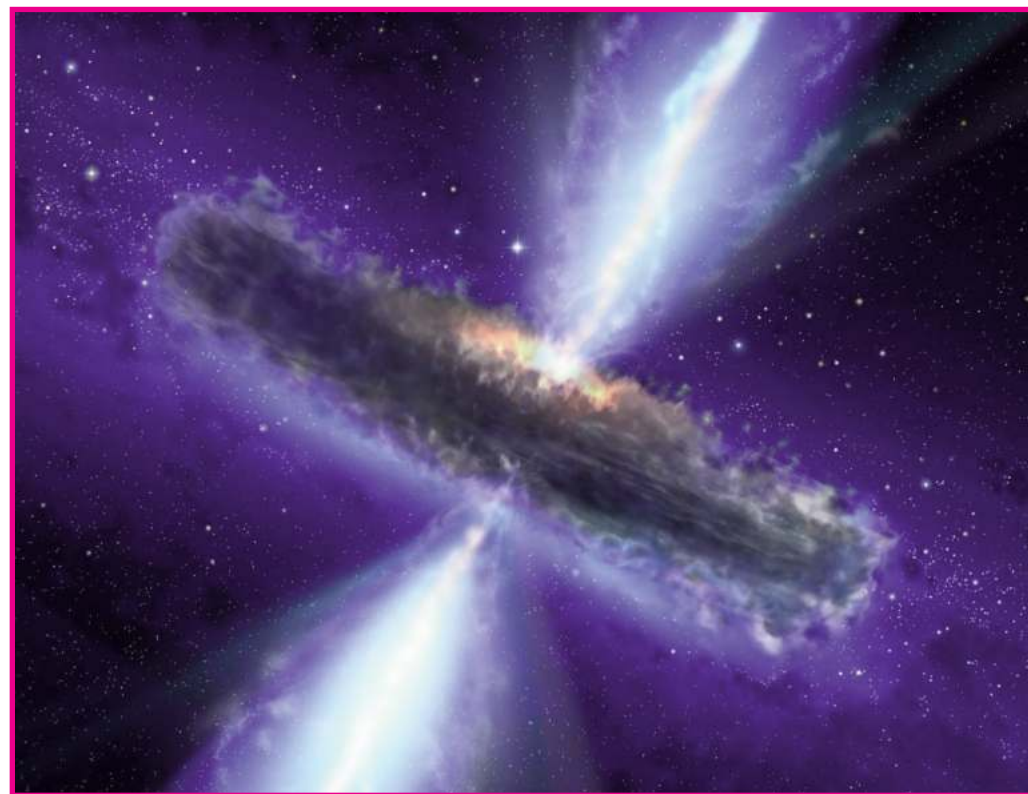
## Los cuásares más brillantes y lejanos, tanto jóvenes como viejos, muestran poderosos vientos galácticos

**EL IAA-CSIC ENCABEZA EL ESTUDIO DE VEINTIDÓS CUÁSARES MUY LUMINOSOS Y DISTANTES QUE COMPLETA NUESTRO CONOCIMIENTO SOBRE LA DIVERSIDAD DE ESTOS OBJETOS**

Los cuásares son uno de los objetos más luminosos que podemos observar en el universo. Al igual que el resto de las galaxias activas, presentan una estructura formada por un agujero negro supermasivo central rodeado de un disco de gas que lo alimenta, todo ello embebido en un toroide, una especie de donut de gas y polvo que oculta las regiones centrales. Su estudio, desde hace más de seis décadas, ha permitido establecer diferencias y separar poblaciones, y un trabajo revela ahora que los cuásares más brillantes y lejanos presentan poderosos vientos, capaces de generar grandes cantidades de energía y de transportar gas a grandes distancias.

Conocemos la estructura de los cuásares indirectamente, gracias a la espectroscopía, una técnica que descompone su luz y que permite estudiar el movimiento del gas hasta regiones próximas al horizonte de sucesos del agujero negro (la zona a partir de la cual la gravedad es tan intensa que ni la luz puede escapar). Pero, a diferencia de las estrellas, los cuásares muestran distintas características espectroscópicas dependiendo del ángulo de visión (por ejemplo, si el toroide está de canto oculta la región central), y esto complicó históricamente el desarrollo de una herramienta que ordenara la diversidad de cuásares.

“Hoy, en cambio, usamos una pode-



Esquema que muestra los componentes básicos de un cuásar: un agujero negro supermasivo, un disco de acreción y un toroide de polvo. Fuente: HST.

rosa herramienta para organizar la diversidad observada. Denominada 4DE1, se basa en cuatro medidas de observación independientes (dos en luz visible y una ultravioleta y rayos X). En concreto, la información en luz visible nos permite separar los cuásares en dos poblaciones diferentes: cuásares jóvenes que muestran un agujero negro poco masivo y una alta tasa de acreción de materia (población A), y cuásares viejos con un agujero negro muy masivo que absorben poca materia (población B)”, señala Alice Deconto-Machado, investigadora del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que encabeza el trabajo. Gracias al uso de 4DE1, hoy se comprenden bien las características de los cuásares cercanos, pero el escenario no está tan claro para los cuásares distantes. El trabajo ha ampliado el estudio de estas poblaciones a fuentes muy lejanas y de alta luminosidad

con una muestra de veintidós cuásares observados con el Very Large Telescope (VLT), que forma parte del Observatorio Europeo Austral (ESO), y con datos adicionales en el ultravioleta de bases de datos astronómicas, especialmente del *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). La luz de estos cuásares ha tardado unos siete mil millones de años en alcanzarnos, de modo que la emitieron cuando el universo tenía la mitad de su edad actual. Los nuevos espectros han permitido al equipo científico estudiar la estructura y la cinemática del disco de acreción y la física del cuásar en regiones muy cercanas al agujero negro, de apenas semanas luz de distancia. “Hemos aplicado un método muy robusto de descomposición de las líneas espectrales y hemos hallado señales inequí-

vocas de la existencia de poderosos flujos de gas, tanto en la población A como en la población B –apunta Alice Deconto-Machado (IAA-CSIC)–. Vemos también que esos flujos proceden de distintas escalas espaciales, desde las regiones más próximas al agujero negro como desde el disco de acrecimiento”.

La retroalimentación de los núcleos galácticos activos (AGN) se considera uno de los principales contribuyentes al proceso evolutivo de las galaxias. La exploración del espacio 4DE1 al completo permite comprender cómo los agujeros negros supermasivos coevolucionan con sus galaxias anfitrionas, lo que está estrechamente relacionado con sus tasas de acreción y la presencia de vientos y chorros nucleares.



## El cambio climático aumentará los incendios forestales producidos por rayos de tormenta

**EL IAA-CSIC ENCABEZA UN ESTUDIO QUE CONCLUYE QUE LOS RAYOS PODRÍAN AUMENTAR UN 40% ANTES DEL FIN DE ESTE SIGLO**

Los rayos son la principal causa de incendios naturales en el mundo, que pueden propagarse rápidamente en función de las condiciones meteorológicas y del combustible disponible, liberando a la atmósfera cantidades considerables de carbono, óxidos de nitrógeno y otros gases que intervienen en la crisis climática. Distintos estudios han sugerido que la frecuencia y distribución de los rayos puede cambiar en el futuro, y un estudio encabezado por el IAA-CSIC y publicado en *Nature Communications* muestra un aumento de más del 40% en los rayos totales, lo que aumenta a su vez el riesgo de incendios forestales.

“Este trabajo pretende explorar la variación de los rayos para predecir patrones futuros de incendios forestales, y para ello hemos combinado las mediciones de rayos proporcionadas por el instrumento GLM, a bordo del satélite GOES-R, con la base de datos de incendios forestales proporcionada por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos. Nuestra investigación indica que los rayos con corrientes continuas tienen una mayor probabilidad de provocar incendios forestales en comparación con aquellos sin corrientes continuas”, apunta Francisco J. Pérez-Invernón, investigador del IAA-CSIC con una beca de posdoctorado de la Fundación “la Caixa” que lidera el estudio.

Los rayos con corriente continua, que constituyen en torno al 10% del total

de los rayos que se producen, son un tipo específico de rayo que presenta una descarga de muy larga duración (decenas o centenares de milisegundos), que suministra más energía a la vegetación y aumenta la probabilidad de incendio.

“Simulamos la década de 2090 bajo el escenario de la Trayectoria de Concentración Representativa 6.0 (RCP6.0), uno de los escenarios de estabilización de las emisiones definidos en el quinto informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Nuestros resultados mostraron un aumento del 43% y del 41% en los rayos totales y de larga duración a nivel mundial, respectivamente. En particular, se observó un aumento del 47% de los rayos de larga duración sobre la tierra, lo que podría aumentar el riesgo de incendios forestales inducidos por rayos en el futuro”, señala Francisco J. Pérez-Invernón (IAA-CSIC / La Caixa).

Los resultados predicen una disminución del riesgo de incendios forestales provocados por rayos en las regiones polares en la década de 2090, excepto

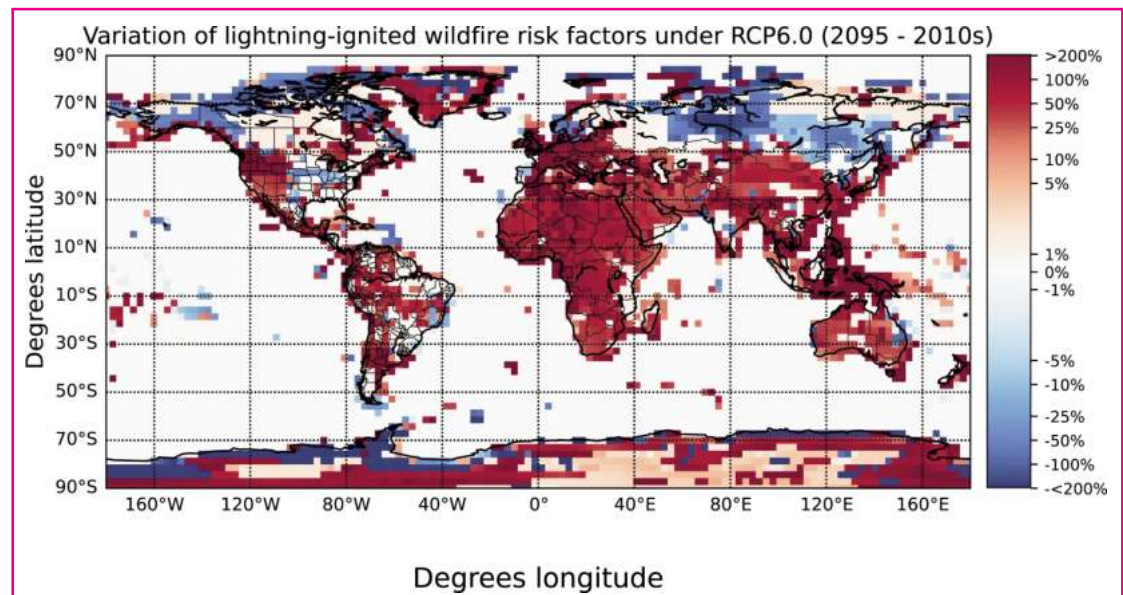
Los cambios en el riesgo se han calculado a partir de la variación de los rayos totales, los rayos de corriente continua, el déficit de presión de vapor, la temperatura, la lluvia total y la humedad relativa sobre el océano entre los periodos 2009-2011 y 2091-2095. La barra de color se ha saturado deliberadamente en los extremos superior e inferior debido a la gran variabilidad del riesgo trazado.

en algunas pequeñas áreas de Escandinavia, Alaska y Siberia, donde el riesgo podría ser elevado debido a un aumento de los rayos de corriente prolongada. Por otro lado, apuntan a un mayor riesgo de incendios forestales provocados por rayos en el Sudeste Asiático, Sudamérica, África y Australia, y un cambio notable en los patrones regionales en Norteamérica y Europa. En concreto, estiman un gran aumento de los incendios forestales provocados por rayos a lo largo de la cuenca mediterránea y en las costas occidental y central de Norteamérica en la década de 2090.

“Además, hemos visto que el aumento de temperatura y de la probabilidad de que se produzcan tormentas secas en la cuenca mediterránea aumentarán la probabilidad de que los rayos produzcan incendios. Las tormentas secas son aquellas en las que la alta temperatura en niveles cercanos al suelo

favorece que las gotas de lluvia se sequen antes de llegar a la superficie, aumentando así la probabilidad de que un rayo produzca un incendio y de que el mismo se extienda”, añade el investigador.

Este estudio no ha podido ofrecer resultados concluyentes en otras áreas de la península, un vacío que cubrirá un satélite geoestacionario recientemente lanzado por Europa. Denominado Meteosat Third Generation, incorpora un instrumento óptico capaz de observar, de forma continua y por primera vez en Europa y África, la ocurrencia de rayos y su posible descarga continua. “Sin duda, los datos que nos proporcionará este instrumento y el uso de modelos regionales podrán ayudarnos a predecir mejor la variación futura en el riesgo de incendio por rayo en la Península Ibérica”, concluye Pérez-Invernón (IAA-CSIC / La Caixa).



## Un sistema planetario compuesto por una supertierra y un minineptuno, clave para entender cómo se forman los planetas

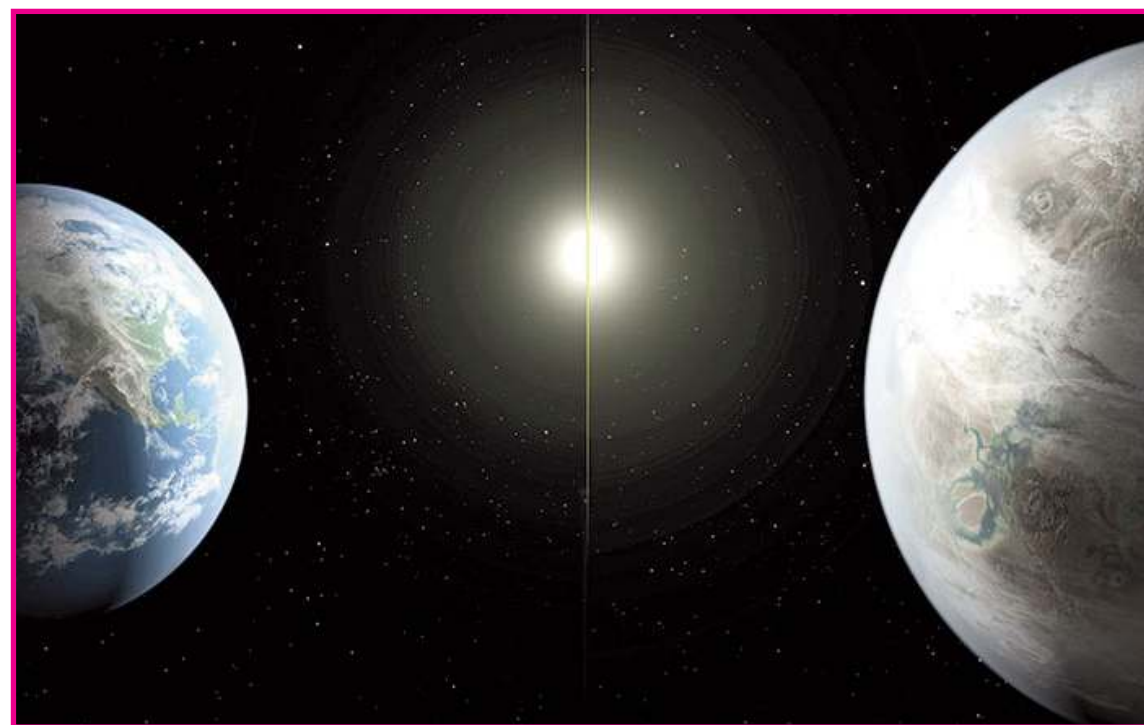
**EL IAA-CSIC ENCABEZA EL HALLAZGO DE TOI-2096, UN SISTEMA PLANETARIO ÚNICO EN SU ESPECIE**

Un equipo científico, encabezado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) y con la participación de la Universidad de Granada, ha descubierto un sistema planetario único. Denominado TOI-2096, está compuesto por una supertierra y un minineptuno, que orbitan una estrella fría y cercana en un baile sincronizado y que podría funcionar como una piedra Rosetta para comprender cómo funciona la gestación planetaria.

El sistema fue identificado por la misión Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) de la NASA, una misión espacial que busca planetas alrededor de estrellas cercanas y brillantes. “TESS está realizando una búsqueda de planetas por todo el cielo utilizando el método de tránsito, es decir, monitoreando el brillo estelar de miles de estrellas cercanas en espera de un ligero oscurecimiento, que podría ser causado por el paso de un planeta entre la estrella y el observador. Sin embargo, a pesar de su poder para detectar nuevos mundos, la misión TESS necesita apoyo de telescopios en tierra para confirmar la naturaleza planetaria de las señales detectadas”, explica Francisco J. Pozuelos Romero, investigador del IAA-CSIC y autor principal del trabajo.

### Una configuración muy particular

“Los planetas TOI-2096 b (supertierra) y TOI-2096 c (minineptuno), fueron observados con una red internacional de telescopios terres-



tres, permitiendo así su confirmación y caracterización. “Haciendo un análisis exhaustivo de los datos, encontramos que los dos planetas se encontraban en órbitas resonantes, es decir, por cada dos órbitas de TOI-2096 b, TOI-2096 c realiza una. Esta configuración es muy particular y debido a ella los planetas interactúan fuertemente de manera gravitatoria, lo que permite obtener sus masas, algo que estamos haciendo justo ahora con medidas ultraprecisas del telescopio de 2.2 metros del Observatorio de Calar Alto” señala Pedro J. Amado, investigador del IAA-CSIC y coautor del artículo.

Los investigadores estiman que el radio de TOI-2096 b es 1.2 veces mayor que el del planeta Tierra (de ahí la denominación de supertierra). Asimismo, el radio de TOI-2096 c es un 55% más pequeño que el de Neptuno (1.9 veces radios terrestres), por lo que se le denomina

minineptuno. Estos tamaños son realmente interesantes pues podrían arrojar luz sobre la anomalía conocida como Valle del Radio, es decir, la ausencia de exoplanetas con radios entre 1.5 y 2.5 radios terrestres, algo que hoy día no cuenta con una explicación aceptada.

“Gracias al análisis global realizado en los servidores de computación de alto rendimiento de la Universidad de Granada pudimos entender que se trata de un sistema único –apunta Juan Carlos Suárez, investigador de la Universidad de Granada y también coautor del estudio–. La formación de planetas pequeños, de menos de cuatro radios terrestres, sigue siendo hoy día un misterio, ya que existen diferentes modelos que intentan explicar cómo se forman los planetas con tamaños entre la Tierra y Neptuno, pero ninguno acaba de ajustarse a las observaciones. TOI-

2096 es el único sistema conocido que tiene un planeta pequeño, probablemente rocoso, y uno más grande con el tamaño justo donde todos los modelos se contradicen. Es decir, TOI-2096 puede ser la piedra Rosetta que estábamos buscando para entender cómo se forman los sistemas planetarios”.

“Además, gracias al tamaño relativo de estos planetas y su estrella, junto con el brillo de esta, este sistema se halla entre los mejores para estudios en detalle con telescopio espacial James Webb, para lo que nos estamos coordinando con otras universidades y centros de investigación. Estos estudios nos permitirán saber con más precisión cómo se formó el sistema y si, como creemos, el planeta TOI-2096 c es un mundo oceánico, lo que abriría todo un abanico de posibilidades para futuros estudios”, concluye Francisco J. Pozuelos (IAA-CSIC).



## Una corriente cósmica que muestra cómo se forman las galaxias

**EL IAA-CSIC PARTICIPA EN EL HALLAZGO DE UNA CORRIENTE DE GAS QUE ALIMENTA UNA GALAXIA LEJANA Y MASIVA, Y QUE APUNTA A LA EXISTENCIA DE UNA RED DE SUMINISTRO DE MATERIAL A GRAN ESCALA EN EL UNIVERSO**

Sabemos que el crecimiento de las galaxias en la infancia del universo se produjo por la acumulación de gas aportado desde su entorno, y las simulaciones por ordenador predicen la existencia de corrientes cósmicas de gas que fluyen hacia las galaxias distantes, alimentándolas. Ahora, un equipo científico que estudia el universo primitivo ha hallado una larga corriente de gas que discurre hacia una galaxia masiva y que le suministra la materia prima para formar miles de millones de nuevas estrellas. El descubrimiento, realizado con el telescopio ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*) y publicado hoy en la revista *Science*, arroja luz sobre cómo se formaron las galaxias.

La corriente detectada fluye hacia la galaxia 4C 41.17, también conocida como la Galaxia del Hormiguero porque está formada por numerosas galaxias pequeñas que llegarán a fundirse por efecto de la gravedad y terminarán formando una única galaxia masiva. Se trata de una galaxia muy lejana, cuya luz emergió unos mil quinientos millones de años después del Big Bang, cuando el universo tenía poco más que una décima parte de su edad actual. Su observación nos permite, así, vislumbrar etapas muy remotas en la historia del universo.

“De manera similar a los ríos que fluyen hacia el océano y transportan sedimentos ricos en nutrientes, las nuevas



observaciones de ALMA revelan una corriente cósmica que contiene una gran cantidad de gas frío rico en átomos de carbono”, explica Bjorn Emonts, investigador del Observatorio Radioastronómico Nacional de Estados Unidos (NRAO) y autor principal de la investigación. “Este gas constituye la materia prima a partir de la que se formarán nuevas estrellas”.

Con la cantidad de gas que recibe, en la galaxia pueden formarse cientos de estrellas nuevas cada año. “Esto coincide con el ritmo de formación estelar observada anteriormente en el Hormiguero, e indica que es probable que la corriente cósmica sea la fuente primaria de materia prima que la Galaxia del Hormiguero necesita para seguir creciendo”, afirma Montserrat Villar-Martín, investigadora del Centro de Astrobiología (CAB/CSIC-INTA), que participa en la investigación.

De hecho, esta corriente podría contribuir a que el Hormiguero crezca hasta convertirse en una galaxia gigante. Y, al contrario, si el suministro de gas se detuviera, estaría destinada a conver-

tirse en una galaxia estéril poblada únicamente por estrellas viejas en unos quinientos millones de años, un periodo breve de tiempo en escalas cósmicas.

### Possible suministro a gran escala

El equipo científico concluye que la corriente procede de lo que se conoce como “red cósmica”, o la estructura en forma de red de filamentos interconectados de gas, galaxias y materia oscura que se extiende por todo el universo. “La corriente cósmica que hemos detectado abarca casi medio millón de años luz, lo que es equivalente a casi diez veces el tamaño de nuestra galaxia, la Vía Láctea –apunta Miguel Pérez Torres, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que participa en el hallazgo–. Pero se trata de una estructura pequeña comparada con la vasta escala de la red cósmica. Si ambas están conectadas, eso significaría que la Galaxia del Hormiguero no se está construyendo de forma

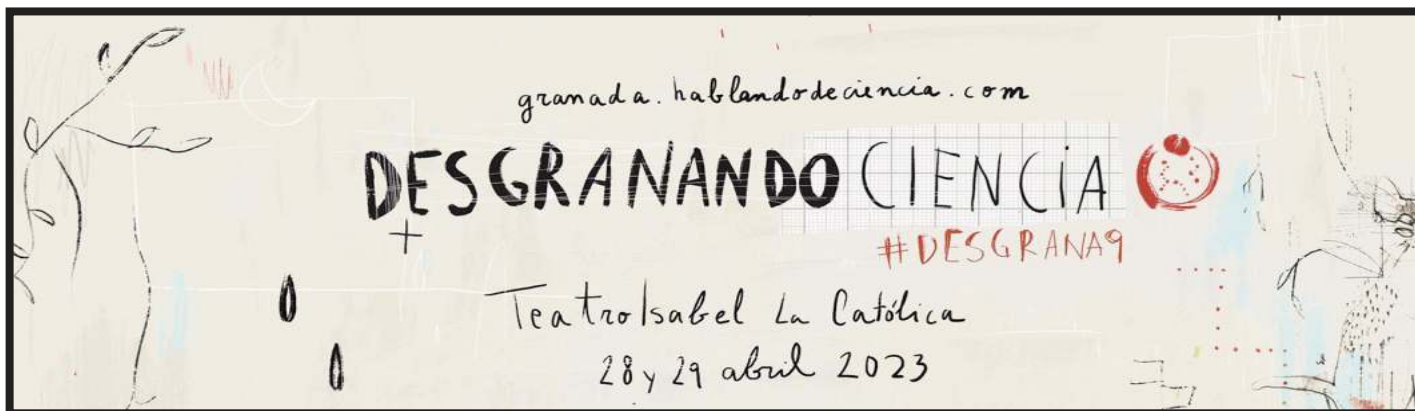
aislada, sino que tiene una línea de suministro vinculada al almacenamiento de gas a gran escala en todo el universo”.

Se cree que la red cósmica contiene principalmente hidrógeno y helio, los elementos primordiales que se produjeron en el Big Bang. La gran cantidad de carbono que alberga la corriente supuso una sorpresa, ya que este elemento, como muchos otros, solo se produce en las estrellas. Es probable que la presencia de carbono signifique que la corriente arrastra pequeñas galaxias, tal y como predicen las simulaciones numéricas: las estrellas de estas pequeñas galaxias enriquecen la corriente con carbono y otros materiales “de construcción” antes de llegar al Hormiguero.

El equipo científico espera que futuras observaciones con ALMA revelen si las corrientes cósmicas de gas rico en carbono están conectadas también con otros hormigueros distantes, en una red cósmica de líneas de suministro que contribuiría a construir galaxias.

# RECOMENDADOS

## DESGRANANDO CIENCIA. CICLO COMPLETO ONLINE



El evento de divulgación científica referencia en Andalucía, que tuvo lugar en el Teatro Isabel la Católica (Granada) los días 28 y 29 de abril de 2023, tiene todas las sesiones disponibles online. Inteligencia artificial, astronomía, biotecnología, historia, cultura, arte, psicología, antropología... Charlas breves de 10 minutos en el escenario, con espectáculos que mezclan música, teatro y ciencia.

[granada.hablandodeciencia.com/directo](http://granada.hablandodeciencia.com/directo)

## LIBROS DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA (¡FELIZ VERANO!)

