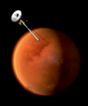
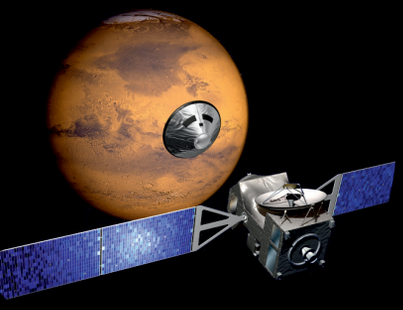


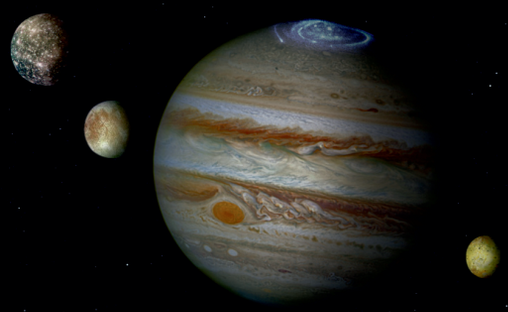
59
OCTUBRE DE 2019
revista.iaa.es

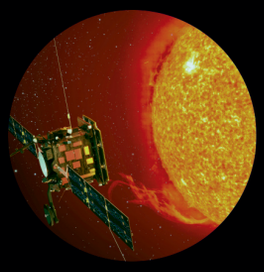
IAA

Información y actualidad astronómica

Revista de divulgación del Instituto de Astrofísica de Andalucía

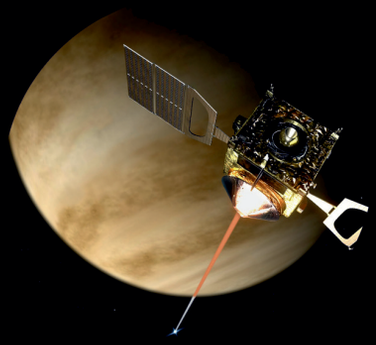






De Granada al cielo

Cuatro décadas de exploración espacial en el IAA



CSIC
INSTITUTO de ASTROFÍSICA de ANDALUCÍA
CSIC
I·A·A
EXCELENCIA
SEVERO
OCHOA

Directora: Silbia López de Lacalle. **Comité de redacción:** Antxon Alberdi, Carlos Barceló, 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: 694-19-060-5
Depósito legal: GR-605/2000
ISSN: 1576-5598

SUMARIO

De Granada al cielo. Exploración espacial desde el IAA ... 3
Dallol: vida en el infierno terrestre ...7
El Moby Dick de... Jesús A. Toalá (IRyA/UNAM) ...11
Deconstrucción. Nuevos planetas desde el Observatorio de Calar Alto ... 12
Actualidad ...14
Pilares e incertidumbres. La inclasificable materia oscura ...22

EL INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA (IAA-CSIC) RECIBE EL DISTINTIVO DE CENTRO DE EXCELENCIA SEVERO OCHOA

El ministro de Ciencia, Innovación y Universidades en funciones, Pedro Duque, presidía el pasado 9 de septiembre el acto oficial de entrega de los distintivos Severo Ochoa a los galardonados más recientes, entre los que se encuentra el IAA-CSIC. Isabel Márquez, vicedirectora del IAA y directora científica del proyecto Severo Ochoa, recogía el distintivo, que reconoce a los centros que realizan investigación básica de frontera y se encuentran entre los mejores del mundo en su área de trabajo. El IAA es el único centro andaluz con este sello de excelencia de un total de veinticinco concedidos a día de hoy.

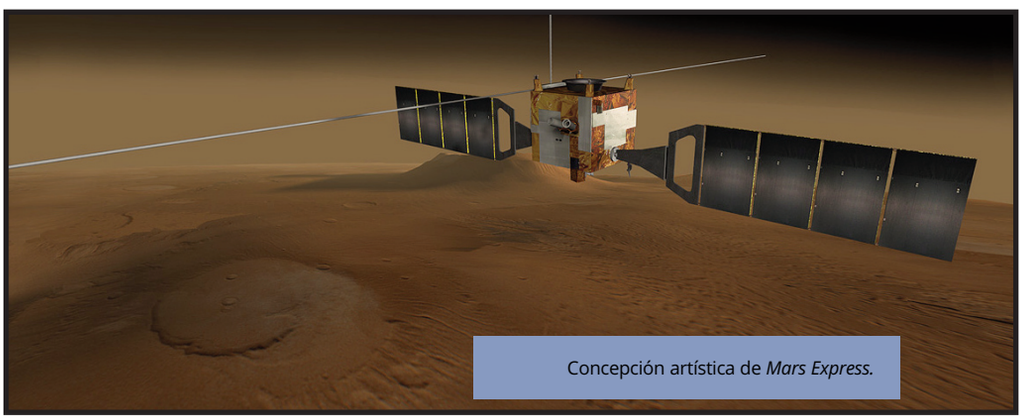
EL IAA OBTIENE UN ACCÉSIT DEL DISTINTIVO DE IGUALDAD DEL CSIC

La presidenta del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Rosa Menéndez, entregaba el 23 de octubre los Distintivos de Igualdad del CSIC 2019. Este distintivo es fruto de una resolución adoptada en marzo de 2018 e impulsada por la presidenta del CSIC con el objetivo de "promover la perspectiva de género como una categoría transversal en todos los aspectos del funcionamiento del CSIC y avanzar en la promoción de las medidas encaminadas a eliminar las barreras que encuentran las mujeres en el ejercicio de su profesión".
Antxon Alberdi, director del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), recogía el Accésit otorgado al IAA.

De Granada al cielo

MÁS DE CUARENTA AÑOS DE EXPLORACIÓN ESPACIAL EN EL IAA

Manuel González (IAA-CSIC)



Concepción artística de *Mars Express.*

Desde su nacimiento hace casi cuarenta y cinco años, el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) ha tenido una clara vocación espacial. A partir de su fundación, en julio de 1975, cuando el instituto estaba formado por un puñado de investigadores e investigadoras que hacían ciencia de primer nivel desde el palacio de la Madraza, siempre se apostó por emprender proyectos para explorar el Sistema Solar. Hoy, cuatro décadas después, el IAA ha colaborado en misiones que han permitido estudiar la atmósfera terrestre, analizar el Sol, caracterizar la atmósfera de Titán, lanzar sondas a Marte o posar instrumentos sobre un cometa. Se puede afirmar que la carrera espacial es uno de los pilares fundamentales de la actividad diaria del centro.

Pero todo ello surgió en un pequeño edificio en el centro de Granada hace bastantes años. En este artículo trataremos de homenajear a varios de los pioneros que, desde los años 70 y con escasos medios, fueron capaces de situar al IAA en una posición privilegiada en la carrera espacial*. Para ello resumiremos varios de los hitos del centro relacionados con la exploración de nuestro Sistema Solar. Como suele ocurrir, no están todos los que son (por limitaciones de espacio), pero sí son todos los que están.

ESTUDIOS ATMOSFÉRICOS

Todo comenzó con el estudio de nuestra propia atmósfera. En 1976, tan solo un año después de la fundación del centro, nacía el Proyecto de Luminiscencia Nocturna, cuyo objetivo principal consistía en la exploración de la alta atmósfera con cohetes de sondeo. Esta tecnología consiste en lanzar proyectiles que efectúan vuelos cortos, de unos tres minutos, y van tomando datos de la emisión de los gases presentes en la atmósfera durante la subida y la bajada. De esta manera, miden la composición atmosférica y proporcionan un diagnóstico de lo que ocurre en las distintas capas. Este proyecto, en colaboración con el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), implicaba a personal de ambos centros. De hecho, varios ingenieros e investigadores del IAA viajaron a Canarias para estudiar cómo se podía hacer ciencia con globos y cohetes de sondeo. Durante varios meses de trabajo se estudiaron las posibilidades que ofrecía esta tecnología, se idearon experimentos, se diseñaron los fotómetros que se requerían para ello… Todo esto se materializó en FOCCA (Fotómetro de Cuatro Canales para la Atmósfera), desarrollado en dos fases (FOCCA1 para condiciones nocturnas y FOCCA2 para el crepúsculo). Ambos lanzamientos se desarrollaron sin contratiempos, y uno de ellos consiguió alcanzar los ochenta kilómetros de altura, un dato superior a lo previsto en el diseño de la misión. A lo largo de los años siguientes, a la luz del éxito conseguido, el IAA continuó diseñando y construyendo cohetes de sondeo, alcanzando cotas cada vez más altas. Uno de los cohetes consiguió analizar el rango de alturas comprendido entre los sesenta y los ciento cincuenta kilómetros, una región de la atmósfera difícil de estudiar y poco comprendida que se conoce, humorísticamente, como ignorosfera.

Imagen de los primeros lanzamientos de cohetes en 1981.

Tras varios lanzamientos exitosos, el proyecto terminó en 1985, pero dio lugar a varias tesis doctorales y, sobre todo, aportó financiación. El apoyo de la CONIE (Comisión Nacional de Investigación del Espacio, un organismo que intentaba que España comenzara con la exploración espacial) resultó fundamental para la realización de las distintas misiones. Previamente Canadá, EEUU y Suecia habían realizado estudios similares. Y este fue quizás uno de los hitos de este proyecto: el IAA había comenzado a establecer contactos científico-tecnológicos con otros países, lo que proporcionó ideas y colaboraciones para continuar explorando el universo.

DE LA TIERRA A MARTE (O CÓMO HACER DE LA NECESIDAD VIRTUD)

A lo largo de los diez años de vida del Proyecto de Luminiscencia Nocturna se fue ampliando el personal dedicado a la investigación espacial. Poco a poco el centro fue acogiendo estudiantes que se especializaron en atmósferas, en ingeniería para la instrumentación… y la financiación iba llegando.

Una vez finalizados los sondeos de la atmósfera terrestre se decidió dar el salto a Marte. Para ello el instituto se involucró en la misión *Mars 96*, que preveía enviar una sonda a Marte en el año 1996 (aunque al

* Mis agradecimientos a José Juan López Moreno (IAA-CSIC), fuente de gran parte de la información de este reportaje.

Misión *Cassini* y el módulo de descenso *Huygens*.

inicio el proyecto estaba previsto para 1994, y se llamaba *Mars 94*). Se trataba de una misión soviética abierta a Europa, y España participaba en ella a través de una colaboración entre el IAA y la empresa SENER, la única en el continente capaz de hacer los radares que *Mars 96* necesitaba. El instituto aportaba de esta manera ciencia e ingeniería. La misión se basaba en el estudio de la superficie, el clima y la estructura interna de Marte. En concreto, el IAA era el responsable del desarrollo de PFS (del inglés *Planetary Fourier Spectrograph*) un espectrógrafo infrarrojo para analizar la abundancia y distribución de componentes minoritarios de la atmósfera marciana como agua, ozono, o monóxido de carbono. La sonda se ensambló con éxito y su lanzamiento tuvo lugar el 16 de noviembre de 1996. Si todo hubiera funcionado correctamente, *Mars 96* habría llegado a su destino en menos de un año, pero un fallo en la tercera fase del lanzador impidió que la sonda saliera de la Tierra y cayera en el Pacífico. Este error supuso un varapalo para la misión.

Sin embargo, el equipo responsable de *Mars 96* tuvo una idea que resultaría en uno de los grandes éxitos de la exploración marciana: siempre que se construye una sonda o un instrumento que se va a lanzar al espacio es necesario fabricar una réplica denominada *spare model* (o modelo de repuesto). Estas copias de los instrumentos que van a enviarse fuera de la Tierra son fundamentales, puesto que permiten probar la tecnología que se va a utilizar, hacer simulaciones, estudiar cómo se podrían reparar… Tras el fracaso de Mars 96 se decidió que se utilizarían los *spare models* construidos para dicha misión para ensamblar una nueva sonda. De esta manera, utilizando piezas de estos instrumentos de prueba, en tan solo dos años estaba lista la sonda *Mars Express*, que fue lanzada el 2 de junio de 2003 y que continúa activa hoy en día. Esta misión, bautizada así por el poco tiempo en el que se materializó, se convirtió en la primera nave europea que visitaba otro planeta, y también contaba con participación del IAA. Más concretamente, el instituto se encargó de diseñar el ordenador central del espectrómetro PFS (basado en el diseño del mismo espectrógrafo para *Mars 96*). Casi todos los instrumentos de esta misión eran europeos y todo funcionó correctamente (salvo el explorador, llamado *Beagle 2*, que no consiguió desplegar los paneles solares que le habrían permitido transmitir datos a la Tierra). En resumen, *Mars Express* supuso un paso adelante en la exploración planetaria europea, y sirvió como precedente para futuras misiones.

Mars Express, bautizada así por el poco tiempo en el que se materializó, fue la primera nave europea que visitaba otro planeta

En todo caso, la exploración del planeta rojo no terminó aquí. El instituto también forma parte del equipo de *Exomars*, una misión de la Agencia Espacial Europea (ESA) y Roscosmos, la agencia espacial rusa, que tiene como último objetivo averiguar si hay o alguna vez hubo vida en Marte. Esta misión tiene lugar en dos fases. La primera, bautizada como *ExoMars 2016,* consta de una sonda, lanzada en marzo de 2016 y actualmente en órbita, que observa el gas de la atmósfera marciana. Contaba además con *Schiaparelli*, un demostrador diseñado para probar el mecanismo de entrada de un futuro rover en el planeta rojo que no logró su objetivo y se estrelló al aterrizar. La segunda fase de la misión, *ExoMars 2020*, prevista para julio de 2020, incluye un rover para explorar la superficie marciana. El IAA ha participado en el desarrollo de NOMAD, una pieza clave del orbital de *ExoMars 2016* específicamente diseñada para estudiar el metano, un gas que en la Tierra producen sobre todo los seres vivos, y cuyo hallazgo en Marte supuso una sorpresa en 2004. Con sus primeros resultados, *ExoMars* ya ha contribuido con datos muy relevantes, que apuntan a que en Marte no hay metano (ver página 14).

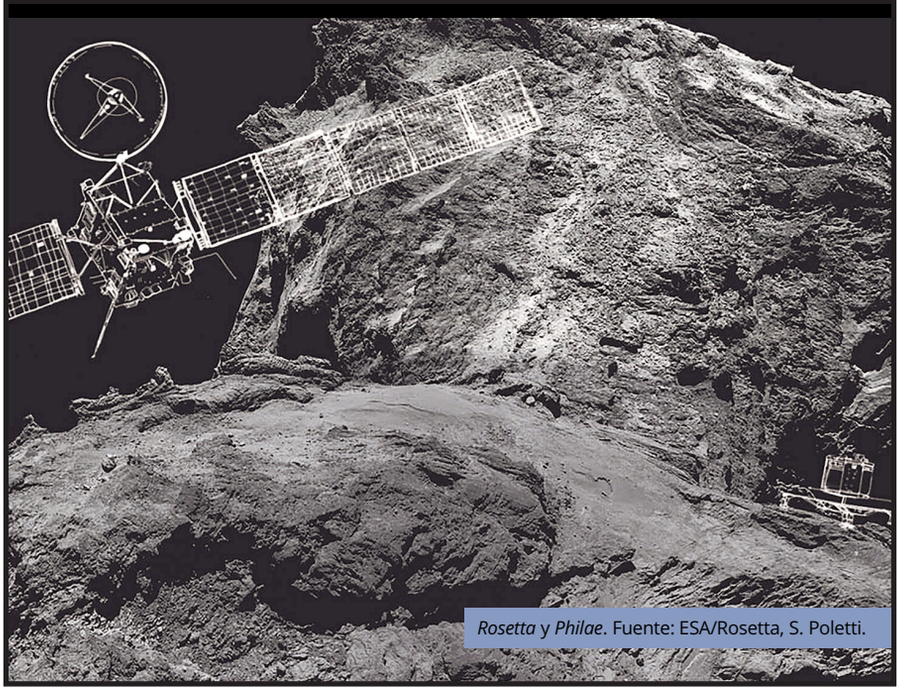
UN LARGO CAMINO HASTA TITÁN

El siguiente paso consistió en el estudio de la atmósfera más similar a la terrestre: la de Titán, el mayor de los satélites de Saturno. A mediados de los noventa, en el intermedio entre *Mars 96* y *Mars Express* comienzan a darse los primeros pasos de *Cassini-Huygens* (NASA/ESA). El objetivo de esta misión era, por una parte, orbitar Saturno y sus lunas y, por la otra, sumergir el módulo *Huygens* en la atmósfera de Titán para determinar su composición química. Lanzada el 17 de octubre de 1997, comenzó a enviar datos desde Saturno el 1 de julio de 2004. Pese a que la misión iba a tener una duración inicial de cuatro años desde ese momento, finalmente estuvo operativa hasta septiembre de 2017, cuando se decidió dirigirla hacia Saturno para que se destruyera en las capas superiores de su atmósfera.

La sonda *Huygens* estaba diseñada para estudiar la composición atmosférica y la superficie de Titán. Este módulo estaba preparado para atravesar la atmósfera con un

paracaídas, aterrizar sobre el satélite e instalar un minilaboratorio que mandaría datos a la Tierra vía *Cassini*. A bordo de *Huygens* se encontraba instalado el instrumento HASI (*Huygens Atmospheric Structure Instrument*), dedicado a medir las propiedades físicas y eléctricas de la atmósfera de Titán. Además, HASI llevaba incorporado un micrófono que permitió grabar sonido durante el descenso y el aterrizaje de la sonda. El IAA fue el encargado de llevar a cabo la calibración de HASI. Este proceso es fundamental antes de lanzar cualquier instrumento en órbita para poder validar los datos científicos obtenidos por él. Para ello se utilizó un globo estratosférico (la misión *Comas Solá*) y se midió en Tierra la conductividad de la atmósfera, aparte de probar el radar altimétrico de *Huygens* (el instrumento encargado de calcular la distancia antes de tomar Tierra).

La misión estaba diseñada para tomar datos únicamente durante el descenso sobre Titán. Las baterías de *Huygens* estaban programadas para durar únicamente cinco minutos tras el aterrizaje, pero fuera de pronóstico consiguieron tomar datos durante tres horas, lo que proporcionó uno de los resultados más inesperados de la misión. HASI midió durante el descenso la cantidad de metano y de nitrógeno molecular en la atmósfera de Titán. Según bajaba, ambos compuestos iban aumentando su concentración. Sin embargo, una vez aterrizado, la cantidad de nitrógeno permanecía estable, mientras que la de metano continuó aumentando hasta saturar los medidores. Esto se debió a que, por casualidad, Huygens aterrizó sobre un charco de metano líquido, que al contacto con la sonda se fue evaporando. Durante las tres horas de vida suplementaria de HASI este instrumento fue tomando datos de cómo el metano se iba evaporando. Este resultado inesperado fue uno de los muchos obtenidos gracias a la misión *Cassini-Huygens*, y se transformó en un gran número de publicaciones científicas (con tan solo tres horas de observación).

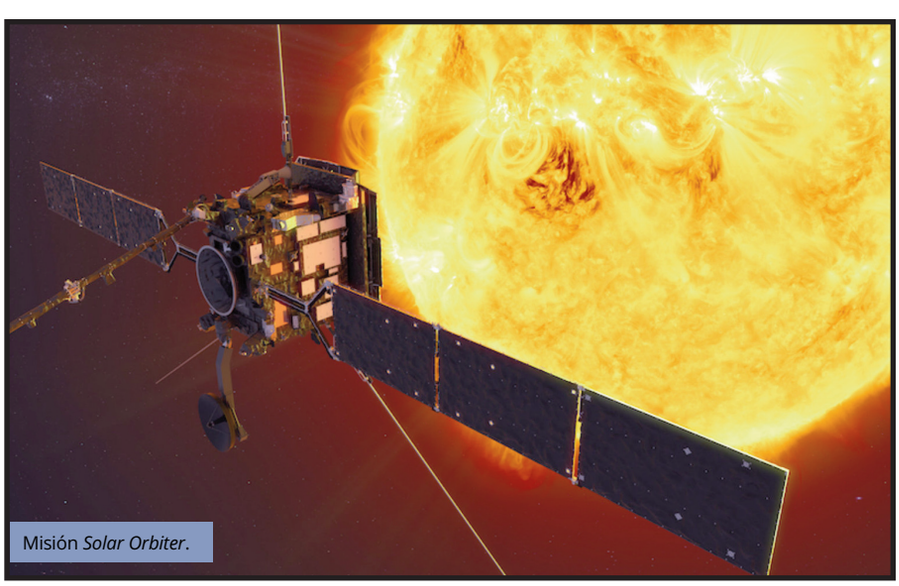


Rosetta y *Philae*. Fuente: ESA/Rosetta, S. Poletti.

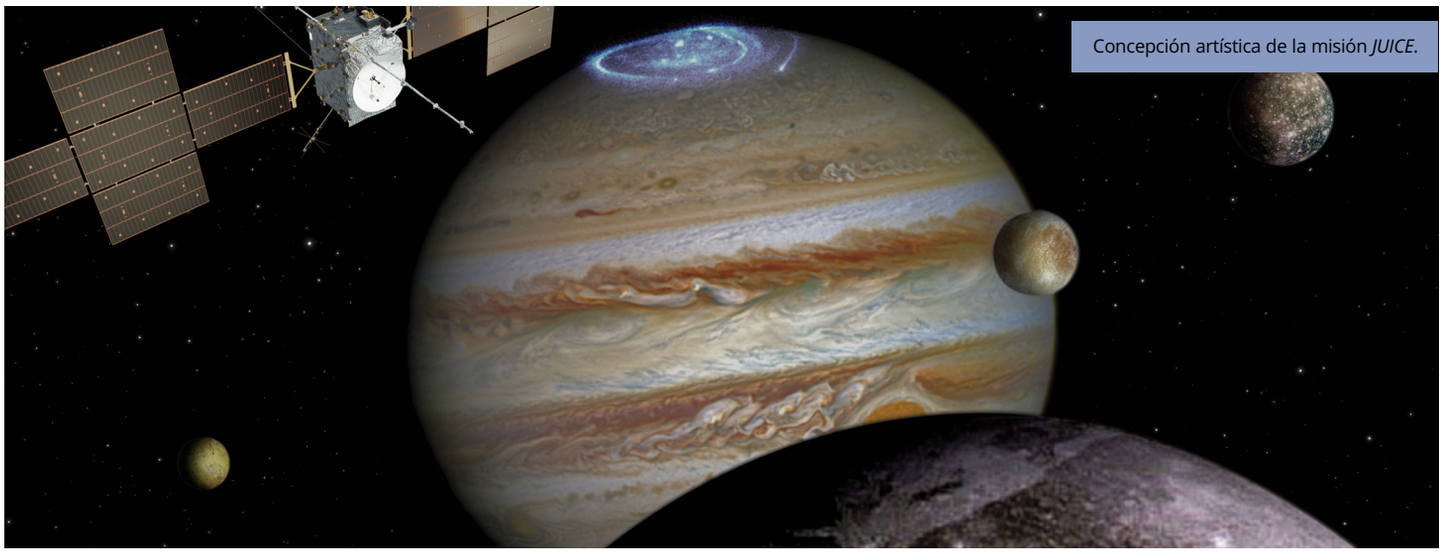
¿Y SI ATERRIZAMOS SOBRE UN COMETA?

Tras el éxito de la misión *Cassini-Huygens*, el IAA se embarcó en uno de los proyectos más ambiciosos de los que ha formado parte. La sonda *Rosetta* se construyó para situarse en órbita alrededor del cometa 67P/Churiumov-Guerasimenko. Se lanzó el 2 de marzo de 2004 y alcanzó su objetivo el 12 de noviembre de 2014 tras recorrer casi seis mil cuatrocientos millones de kilómetros. Además, el proyecto contaba con un módulo de aterrizaje, *Philae*, que se envió a la superficie del cometa con el fin de analizar su superficie. Tanto *Rosetta* como *Philae* contaban con numerosos instrumentos científicos capaces de estudiar el cometa y sus características físicas y químicas. Entre ellos se encontraba una perforadora para tomar muestras internas del cometa. *Rosetta* ha proporcionado las imágenes con mayor resolución tomadas jamás de un cometa. Y gracias a ella se supo que 67P no tiene una forma esférica, sino que parece más bien un patito de goma. *Rosetta* fue testigo *in situ* del nacimiento de la coma y de las colas de un cometa, permitió observar sus estaciones, sus ciclos de hielo de agua y dióxido de carbono, y comprobó que su superficie está compuesta por una gran variedad de terrenos distintos. Por otra parte, *Rosetta* permitió detectar y estudiar compuestos como oxígeno y nitrógeno molecular, xenón, agua, etc. Esto implicaría que el bombardeo de cometas al que estuvo sometida la Tierra hace millones de años pudo tener una influencia importante en la formación de la atmósfera terrestre, pero no así en los océanos (lo que se destaca como uno de los resultados más importantes de esta misión). Paralelamente la misión halló fósforo, así como de varias moléculas orgánicas en el cometa; entre ellas la glicina, un aminoácido complejo que podría indicar que los cometas tuvieron algo que ver con el surgimiento de la vida en la Tierra.

La colaboración del IAA en *Rosetta* se canalizó a través de dos instrumentos. OSIRIS (del inglés *Optical, Spectroscopic and Infrared Remote Imaging System*) era un sistema de dos cámaras, una de enfoque estrecho de alta resolución y otra de enfoque panorámico y de menor resolución que la anterior. El retorno científico de OSIRIS continúa siendo impresionante, con uno o dos artículos científicos al mes en los que se utilizan sus datos. El segundo instrumento con participación del IAA, GIADA (del inglés *Grain Impact Analyser and Dust Accumulator*) analizó la distribución y concentración de gas y polvo en distintas posi-



Misión *Solar Orbiter*.



Concepción artística de la misión *JUICE*.

ciones en torno al cometa. Mediante difracción de polvo, GIADA permitía obtener el producto del tamaño de la partícula y su albedo (o grado de reflectividad), así como el momento cinético de la partícula. Con estos datos era posible estimar, por métodos indirectos, la masa de los granos de polvo. Además de ello, contaba con tres microbalanzas que podían medir la masa directamente si alguna partícula de polvo se posaba sobre ellas. Estas microbalanzas se llenaron de polvo pronto y se saturaron, pero hasta ese momento funcionaron con gran precisión.

Por su parte, el objetivo de la sonda *Philae* consistía en posarse sobre la superficie de 67P y desde ahí llevar a cabo experimentos para determinar las propiedades físicoquímicas del cometa. Sin embargo, los sistemas de anclaje fallaron y *Philae* aterrizó en una zona diferente a la prevista, donde no recibía luz solar y, por lo tanto, no podía alimentar su equipo. Philae dejó de comunicarse con la Tierra al poco tiempo de aterrizar en el cometa, pero durante las horas en las que contó con alimentación pudo poner en marcha varios de sus instrumentos y enviar los datos a la nave.

Los datos de *Rosetta* han generado hasta la fecha más de cien artículos. Un éxito científico que acompaña el desafío tecnológico que supuso la misión, y que convierten a *Rosetta* en un hito en la exploración espacial.

EL SOL: UNA ESTRELLA AL ALCANCE DE NUESTRAS MANOS

El Sol constituye otro de los objetivos de estudio prioritarios en el IAA. Se trata de la estrella más cercana, en cuya superficie podemos distinguir detalles como manchas, protuberancias y fulguraciones. Además, el estudio del Sol permite entender cómo se comportan las estrellas. El grupo de física solar del IAA ha colaborado tanto científica como tecnológicamente en dos misiones que tienen como fin desentrañar los secretos de nuestra estrella. La primera de ellas es *Sunrise*, un globo estratosférico que estudió en dos ocasiones (2009 y 2013) nuestra estrella desde las regiones polares de la atmósfera terrestre, y que volará de nuevo en 2021 con mejoras tecnológicas sustanciales. A bordo de este globo vuela el instrumento IMAX, desarrollado en el IAA y dedicado a la obtención de imágenes cuasimonocromáticas de los cuatro parámetros de Stokes en varias longitudes de onda. Estos parámetros permiten reconstruir el valor de los campos magnéticos en nuestra estrella, y los datos del instrumento IMaX se han traducido en numerosos resultados científicos sobre el magnetismo solar.

Esta exitosa actividad espacial ha contribuido a que el IAA sea reconocido como centro de excelencia Severo Ochoa

Por otra parte, la misión *Solar Orbiter* (ESA), con lanzamiento previsto para 2020, orbitará el Sol a una distancia menor que la de Mercurio y con una inclinación que le permitirá observar los polos del Sol por primera vez en la historia. El IAA colidera el instrumento SO/PHI, que realizará un cartografiado preciso del campo magnético solar, responsable de la mayoría de los fenómenos que se observan en nuestra estrella, como manchas, protuberancias, espículas, fulguraciones o tormentas solares. SO/PHI medirá también la velocidad del plasma en la fotosfera, la capa que vemos cuando miramos el Sol, así como el origen del viento solar.

RETOS FUTUROS: MERCURIO, JÚPITER Y EXOPLANETAS

Desde que el IAA comenzara su actividad espacial hace ya más de cuarenta años, el centro ha aumentado su personal considerablemente y hoy cuenta con una Unidad de Desarrollo Instrumental y Tecnológico (UDIT), un equipo dedicado al desarrollo de instrumentación. En su agenda se suman los proyectos ya mencionados como *Sunrise* o *Exomars*, así como otros como *BepiColombo*. Esta misión de la ESA y la JAXA, lanzada en 2016, estudiará la composición geofísica, la magnetosfera e incluso la historia de Mercurio, uno de los planetas menos explorados del Sistema Solar. La contribución del IAA se ha centrado en el altímetro láser BeLA (del inglés *Bepi Colombo Laser Altimeter*).

¿Qué nos deparará el futuro? El año que viene comenzará el vuelo de *Solar Orbiter*. Además, el IAA está fuertemente implicado científica y tecnológicamente en *JUICE*, prevista para 2022, que explorará tanto Júpiter como sus satélites Ganímedes, Europa y Calisto. Y en *PLATO*, que despegará en 2026 y buscará y caracterizará planetas extrasolares rocosos alrededor de estrellas similares al Sol. Esta exitosa actividad espacial ha contribuido a que el IAA sea reconocido como centro de excelencia Severo Ochoa, el único de Andalucía con esta distinción a día de hoy. Todo esto no habría sido posible sin el empeño y esfuerzo de unos científicos y científicas que, desde su despacho de la Madraza, hace ya más de cuarenta años, soñaron un día con conquistar el cielo.

Dallol: vida en el infierno terrestre

LAS SINGULARIDADES GEOLÓGICAS DE LA DEPRESIÓN DE DANAKIL HACEN DE ESTE LUGAR EL MÁS EXTREMO DE LA TIERRA

Felipe Gómez Gómez
(CAB, CSIC-INTA)

¿Qué es la vida? Esta es una pregunta que ya en el año 1943 se planteó el físico Erwin Schrödinger durante el seminario *¿Qué es la vida? Los aspectos físicos de la célula viva*, bajo el auspicio del Instituto de Estudios Avanzados de Dublín en el *Trinity College*. Posteriormente, mediante el compendio de los resúmenes de dicho seminario, el proyecto se materializó en un libro titulado *¿Qué es la vida?* editado en 1944. La dificultad para definir ese proceso físico-químico que conocemos como vida hace que los científicos sigamos sin ponernos de acuerdo en la respuesta muchos años después de haber sido planteada.

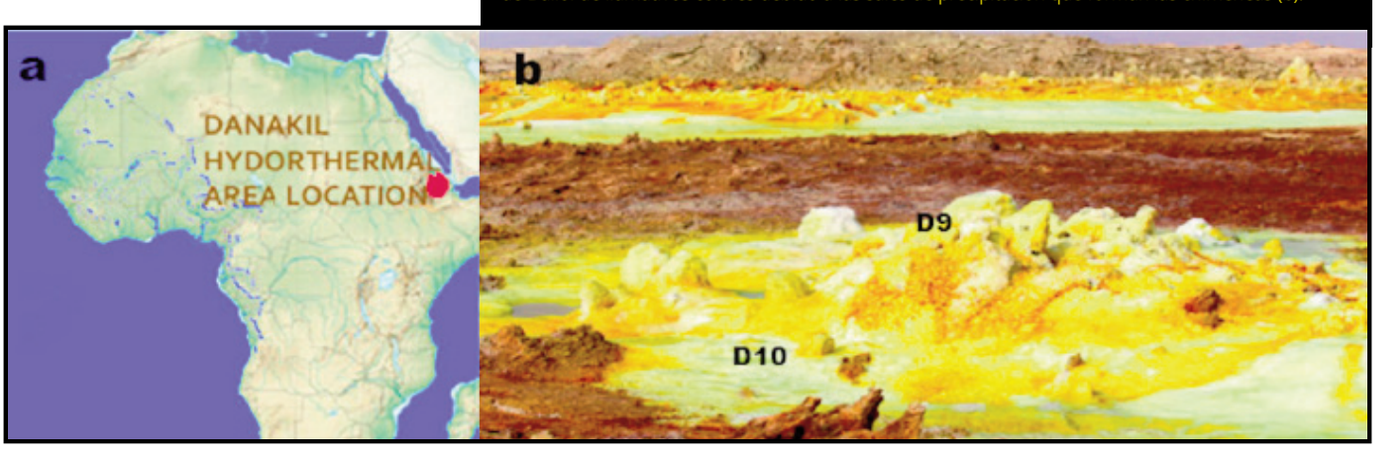
Algunos científicos hemos optado por la búsqueda de la respuesta a esta pregunta abordándola desde el estudio de sus fronteras, es decir, estudiando sus límites, intentando entender la vida mirando en sus extremos. Por ello, el estudio de la biodiversidad presente en ambientes extremos nos puede aportar información crucial para entender el proceso físicoquímico de la vida. El ambiente más extremo que he encontrado en esta búsqueda se sitúa en el surgimiento hidrotermal de Dallol, en la depresión de Danakil localizada en la región de Afar en Etiopía. En este ambiente tan restrictivo dados sus parámetros ambientales (pH 0, alta concentración de sales y temperaturas por encima de los noventa grados centígrados) hemos podido describir la presencia de microorganismos extremófilos, fundamentalmente bacterias y arqueobacterias, que encuentran su nicho ecológico en los depósitos salinos de las chimeneas hidrotermales. Dado que estos microorganismos afrontan varios parámetros extremos (pH, salinidad, temperatura, …) podemos clasificarlos como poliextremófilos.

DEPRESIÓN DE DANAKIL

Nada más llegar a la región de Afar, ya en la depresión de Danakil (imagen inferior), lo primero que se advierte es el calor asfixiante del aire, acompañado de las tormentas de viento y arena del desierto que hacen que sea difícil moverse en ese entorno tan hostil. Hay que tomarse su tiempo para adaptarse a la zona. También destaca el hecho de que la carretera de acceso a la zona está llena de baches y ondulaciones como si la Tierra se hubiera movido recientemente, y este ir y venir del suelo estuviera provocando las grietas que se advierten en el asfalto. Y así es, esa impresión es acertada, ya que la depresión de Danakil en Etiopía es una zona de subducción y creación de placa terrestre localizada en la parte más próxima al cuerno de África de la gran falla del Rift Africano. En esta zona confluyen tres placas tectónicas donde literalmente se empujan, generando el conocido triángulo de Afar. Este triángulo está formado por el contacto entre la placa Arábiga y dos partes de la Africana, la placa Nubia y la Somalí. Ese movimiento tan activo del suelo se materializa en las grietas y en las grandes rocas que caen desde las laderas sobre el asfalto de la carretera.

En el centro de esta zona geográfica se sitúan los grandes saladares de Danakil y el sistema hidrotermal de Dallol. Esta zona estuvo inundada por el mar Rojo en el terciario, que finalizó con la evaporación de ese cuerpo de agua dejando depósitos de cloruro sódico y cloruro potásico en grandes extensiones de terreno. Eso ha dado lugar a la forma de subsistencia de la zona, las

Localización geográfica de Dallol en la depresión de Danakil en Etiopia (a) y el complejo hidrotermal de Dallol de llamativos colores debido a las sales de precipitación que forman las chimeneas (b).



Dallol, surgimiento hidrotermal de llamativos colores. Los minerales disueltos en las aguas hidrotermales junto con el hierro y la oxidación de ion ferroso a férrico debido al oxígeno de la atmósfera son los responsables últimos de los llamativos colores que se ven en las sales de las chimeneas y en los charcos alrededor de las mismas.

famosas caravanas de camellos, uno de los muchos atractivos turísticos. Grandes bloques de cloruro sódico y cloruro potásico (sal común y potasa) son trasportados desde Berahale hasta las proximidades de Mekelle, ya en la región de Tigrai, más de ciento cincuenta kilómetros bajo el tórrido sol y las altas temperaturas del desierto.

La depresión de Danakil se produce por el descendimiento del fondo del valle en forma de U debido al sistema de fallas paralelas que constituyen el Rift Africano. Estas fallas originan un escarpe lateral que desciende desde los mil doscientos metros de altitud de Mekelle hasta llegar, a medida que nos adentramos en la región de Afar, a los ciento veinticinco metros por debajo del nivel del mar en la zona más profunda próxima a los saladares y al surgimiento hidrotermal de Dallol.

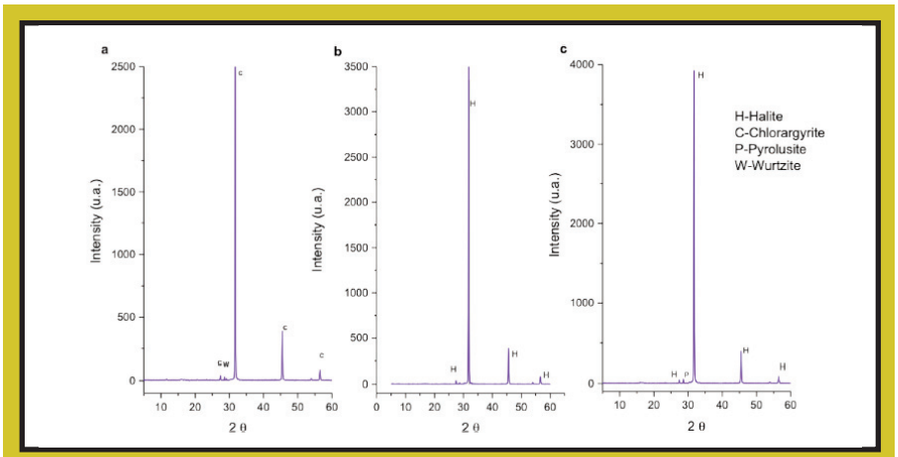
UN SURGIMIENTO HIDROTERMAL DE IMPRESIONANTES COLORES

En la depresión de Danakil se sitúa el complejo hidrotermal de Dallol, un lugar realmente sorprendente por sus llamativos colores (azules, rojos y amarillos muy intensos y brillantes son los protagonistas de este entorno natural). La luz solar se transforma en una miríada de tonalidad de fuertes colores de las sales precipitadas, las chimeneas y los charcos de agua del entorno, que hacen del sitio un paraíso para la fotografía. De vez en cuando surge del suelo una asfixiante niebla amarilla que obliga al visitante a retirarse de la zona hasta que desaparecen las emanaciones de los gases de clorhídrico procedente del subsuelo. A media que te desplazas sobre los distintos géiseres y pequeñas lagunas de colores azules y verdes difíciles de describir, vas hundiendo los pies en los depósitos suaves de sulfuros metálicos e incluso azufre elemental que tapizan el suelo. Hay que tener cuidado de no introducir el pie en algún surgimiento hidrotermal no visible, del que puede emanar agua a noventa o cien grados. Esta zona es muy activa desde el punto de vista geológico, algo fácilmente observable en lo cambiante del entorno. Se nota perfectamente que el lugar es un ambiente extremo desde muchos puntos de vista, empezando por el propio entorno del visitante que tiene que soportar altas temperaturas, fuertes vientos y un sol abrasador. Estamos a unos ciento veinticuatro metros por debajo del nivel del mar Rojo, próximo a la zona. La zona está clasificada como el lugar habitado más caliente del mundo. En invierno se registran temperaturas de cuarenta y cinco grados, y de hasta cincuenta y cinco en verano. El récord de temperaturas más altas se lo disputan Dallol y una zona desértica de Libia, pero en este último caso no hay pobladores que habiten el lugar.

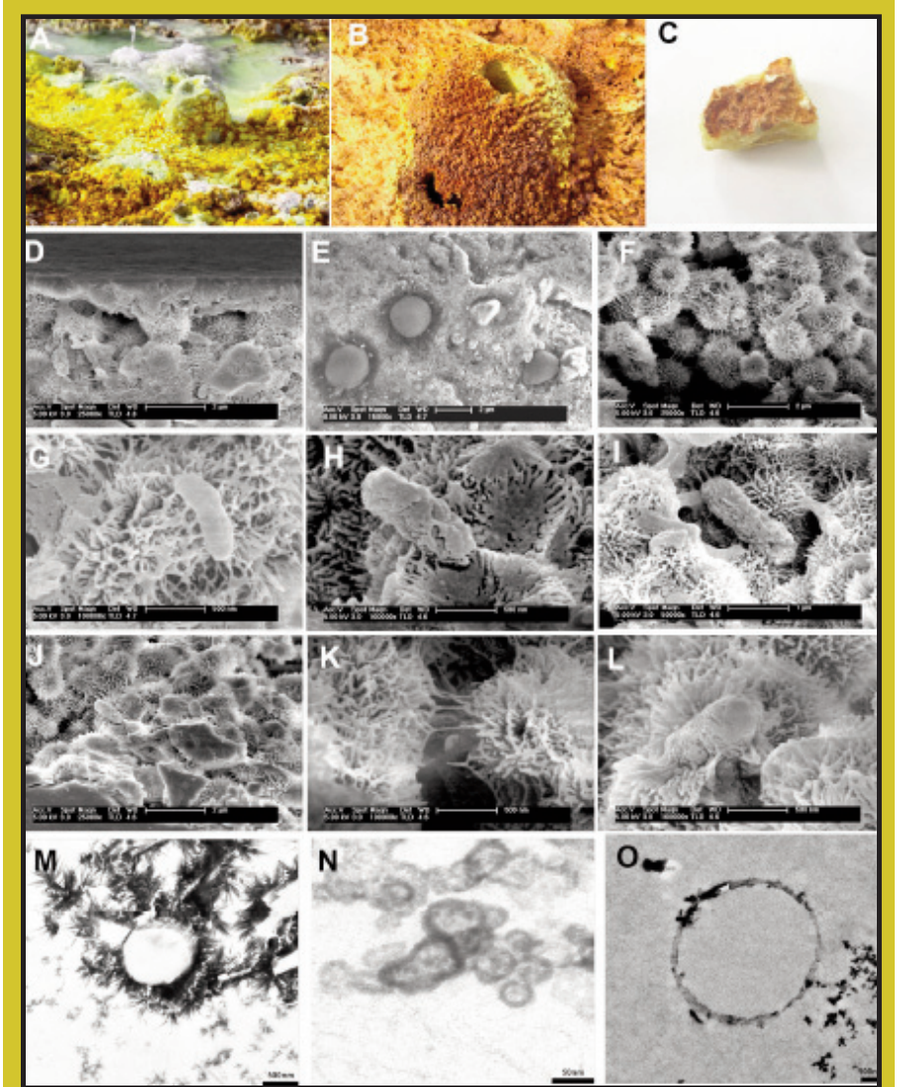
Dallol mantiene una población estable de pobladores afar que, aunque disminuye en número durante los meses de verano, no llega a quedar despoblado. Próximo al surgimiento hidrotermal se sitúa el poblado de Berahale donde se encuentra el último destacamento militar, unos siete kilómetros antes de llegar a Dallol, ya muy próximo a la frontera de Djibouti y Eritrea. Dadas las tensiones políticas y la “permeabilidad” de las fronteras próximas en estas zonas desérticas, el trabajo científico va acompañado de protección militar en todo momento.

VIDA MICROBIANA EN DALLOL

Este ambiente extremo debe su origen a las anomalías geológicas de la zona y a la proximidad del bolo magmático o cámara de magma del subsuelo, que se sitúa a solo unos cinco kilómetros de profundidad. El sistema de fallas y fracturas de la depresión hace que el agua del subsuelo, sobrecalentado por el magma activo tan próximo, salga al exterior cargado de sales disueltas, pH muy ácido (pH 0) y alta temperatura (cuando surge de las chimeneas hidrotermales la temperatura del agua puede alcanzar los ciento veinte grados). Al reducirse la presión y la temperatura del agua en ascenso se produce la precipitación de minerales de llamativos colores que van formando las chimeneas hidrotermales y los depósitos minerales que vemos en este llamativo entorno. Los distintos colores que se advierten en la zona de Dallol se deben a los minerales que precipitan y que forman las chimeneas, además de los altos contenidos de hierro que tiene el sistema. Mediante la técnica de difracción de rayos X se han identificado halita, clorargidrita, wurzita y pirolusita. La química asociada a Dallol es muy compleja, como suele ocurrir en los sitios donde el hierro tiene un papel importante. La química del hierro aporta las tonalidades ocres, rojas e intensos azules de algunas de los charcos que rodean a las chimeneas hidrotermales. Esto es así porque el hierro que surge con las aguas de las chimeneas es oxidado por el oxígeno de la atmósfera,



Arriba: espectro de rayos X de las sales que forman las chimeneas hidrotermales de Dallol y los minerales a que corresponden.
Debajo: Capas minerales que componen las chimeneas hidrotermales (a, b, c). Imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (d-l) y transmisión donde se identifican la presencia de biomorfos, y posteriormente, de microorganismos observados en sección al utilizar transmisión (m-o).
Fuente: Gómez, F. et al., *Scientific Reports* (2019) 9:7907.



pasando de ion ferroso (de color azul) a ion férrico de un intenso color rojo. En último término estos minerales con sus llamativas tonalidades y la compleja química asociada al hierro son los responsables de los colores de Dallol.

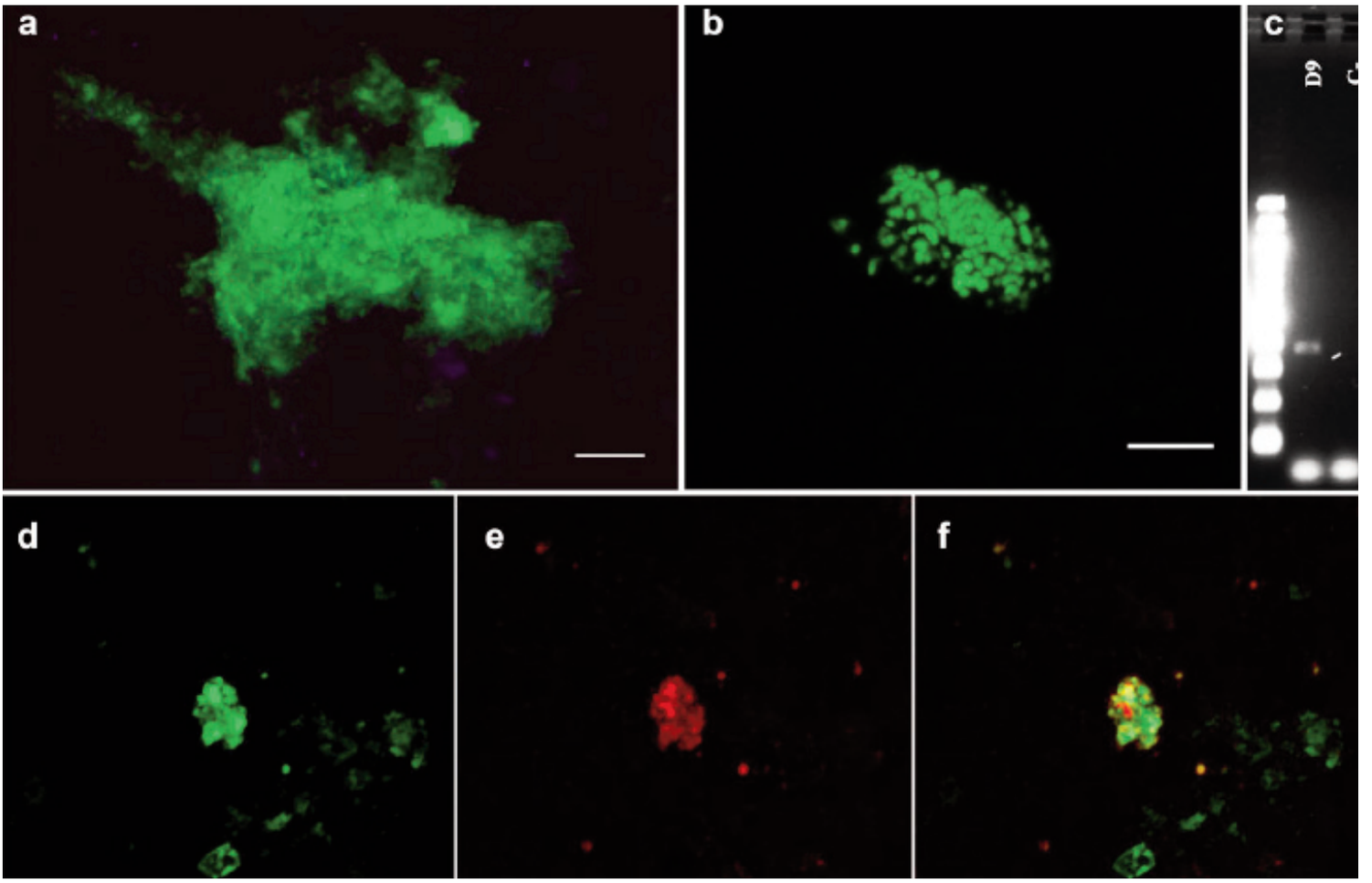
Lo que parece ser un ambiente de interés exclusivamente geológico debido a que a primera vista nos hace pensar que es completamente estéril (parece que la vida microbiana aquí resulta imposible) nos sorprende al observar estructuras tipo biomorfos (estructuras minerales que parecen biológicas) en las muestras mediante microscopía electrónica de barrido (imagen izda). Un estudio más profundo de las muestras en búsqueda de biomarcadores nos confirma la presencia de moléculas orgánicas, particularmente lípidos de origen biológico, y nos pone en la pista de posibles grupos microbianos que pudieran estar presentes en un ambiente tan restrictivo y extremo teniendo en cuenta varios parámetros físicoquímicos como ya hemos comentado. La extracción de lípidos biomarcadores resulta positiva pero también la extracción de ADN. La muestra de partida tiene ácidos nucleicos y, por tanto, nos confirma la presencia de vida.

La biodiversidad que encontramos presente en las chineas hidrotermales de Dallol pertenece a los grupos de bacteria y arqueobacteria. Dentro de las arqueobacterias destaca la presencia de nanohalobacterias (nano, o ultra pequeñas, y halo, que viven a altas concentraciones de sal), un grupo de halobacterias de muy pequeño tamaño (entre cien y quinientos nanómetros) que no han sido descritas previamente en ambientes acidotermófilos.

Estas pequeñas halobacterias han sido encontradas incrustadas en el interior de las sales precipitadas que forman las capas de las chimeneas, un ambiente muy restrictivo para la vida y que supone un límite antes no alcanzado en la descripción de presencia de vida en ambientes extremos. No solo la alta temperatura que alcanza el agua al ascender por las chimeneas sino el nivel de deshidratación que hay en el interior del precipitado mineral al depositarse sobre la chimenea a medida que esta se va formando. Algunos de los charcos que rodean las chimeneas tienen valores de actividad de agua de 0.65-0.70, prácticamente en el límite de los niveles que están descritos que soportan la vida.

Las bacterias que se observan en la página siguiente han sido hibridadas mediante la técnica de *Fluorescence in situ Hybridizatin Technique* (FISH) mediante sondas frente a sus ribosomas, esto quiere decir que para conseguir una hibridación positiva tienen que ser indudablemente bacterias/arqueobacterias de los grupos descritos y “estar activas”, es decir, vivas. Si no estuvieran activas no se produciría la hibridación utilizando este tipo de sondas y de técnica. De esta forma confirmamos que las bacterias no solo están presentes sino que están vivas en los precipitados salinos que forman las chimeneas hidrotermales.

Aparte del reto que supone la supervivencia para estas nanobacterias en un ambiente tan



Consorcios de nanobacterias teñidas con DAPI (a, b). Extracción de ADN que demuestra la presencia de vida en la capas minerales (c) y nano-halobacterias encontradas inmersas en las sales que forman las capas de precipitación de las chimeneas hidrotermales en Dallol hibridadas con sondas específicas para arqueobacterias (d-f).

restrictivo, cabe señalar el interés que suscitan desde un punto de vista astrobiológico. La búsqueda de vida en Marte mediante misiones espaciales que recorren su superficie se ha centrado en lugares donde sabemos que en el pasado hubo agua, donde el planeta pudo ser habitable en tiempos remotos y en el interior de precipitados minerales donde podemos detectar la presencia de pares redox que pueden ser fuente de energía para el desarrollo de la vida.

Por otro lado, el descubrimiento de estas nanobacterias en los precipitados de sales hidrotermales de Dallol vuelva a suscitar la discusión abierta en el pasado con los trabajos de David McKay publicados en 1996 donde se reportó la presencia de nanomicroorganismos y el potencial de habitabilidad que eso suponía para el planeta Marte en el meteorito ALH84001. Este meteorito fue encontrado en la Antártida, en las colinas Allan Hill en 1984. En él se encontraron precipitados minerales con formas biológicas tipo biomorfos de pequeño tamaño. La controversia fue inmediata, habiendo autores que defendían la imposibilidad de que se tratara de microorganismos fosilizados dado el pequeño tamaño (entre cincuenta y cien nanómetros) que tenían los precipitados aparecidos en el meteorito. Las nanobacterias encontradas en Dallol vuelven a abrir el debate ya que presentan tamaños similares a los precipitados encontrados en el meteorito ALH84001, y además hemos podido demostrar que se trata de formas biológicas que están incrustadas en el interior de las sales minerales y que podrían estar relacionadas con los procesos de biomineralización que ocurren en las chimeneas.

Los límites para la vida se van ensanchando a medida que estudiamos ambientes extremos análogos terrestres. Hace un par de décadas se pensaba inviable la presencia de vida más allá de pH 7 y cuarenta grados, lo que se ha demostrado una visión antropocéntrica errónea. En la actualidad hemos podido reportar la presencia de vida allá donde hay agua líquida con un valor de actividad de agua por encima de 0.6 – 0.7 sin importar si el pH es de cero, si la temperatura a la que se encuentra está por encima de los cien grados o si el agua tiene un alto contenido en sales disueltas. Por supuesto, para que el agua sea estable a temperaturas superiores a los cien grados debe estar a alta presión, pero aun así hemos podido reportar la presencia de vida en ambientes hidrotermales como Dallol, donde las restricciones físicoquímicas nos han ampliado el rango de los límites para la vida hasta extremos antes no sospechados. Esto nos aporta una visión mucho más amplia cuando nos planteamos la búsqueda de vida en otros cuerpos planetarios más allá de nuestro planeta. El fenómeno físicoquímico de la vida no deja de sorprendernos y, aunque todavía no seamos capaces de definirlo, está claro que es un sistema de alta flexibilidad que puede darse bajo límites más amplios de los que actualmente creemos conocer. Poder identificar un proceso vivo fuera del planeta Tierra es cuestión de tiempo, sobre todo en estos momentos en los que el descubrimiento de exoplanetas similares a la Tierra ha sido posible. Las técnicas de detección remota de biomarcadores en las atmósferas de dichos planetas nos aportan grandes posibilidades.

Un proceso tan flexible como la vida y con la capacidad de cambio (evolución) que ha demostrado en nuestro planeta debe haber sido capaz de arraigar en otros ambientes, quizá similares al terrestre. Esperemos poder reportar científicamente, y a corto plazo, el hallazgo de biomarcadores o, por qué no, de vida activa en otro planeta, una noticia que además tendría grandes implicaciones filosóficas y que sería de gran relevancia para la humanidad.

© Todas las fotos de este artículo llevan el siguiente copyright: F. Gómez/Europlanet H2020 RI.

EL MOBY DICK DE...

...JESÚS A. TOALÁ (IRyA/UNAM)

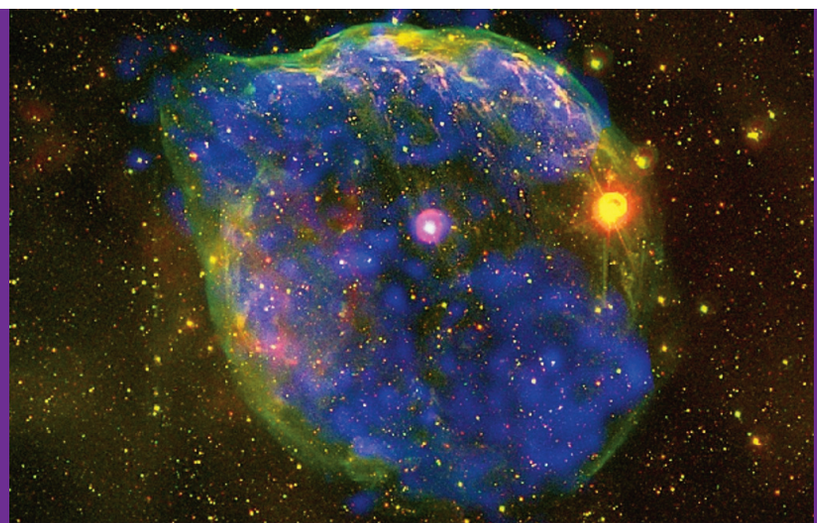
Licenciado en física en la Universidad Autónoma de Sinaloa, realizó su maestría en el Centro de Radioastronomía y Astrofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el doctorado en el Instituto de Astrofísica de Andalucía. En la actualidad es investigador del Instituto de Radioastronomía y Astrofísica (IRyA) de la UNAM y su investigación se centra en el estudio en rayos X de estrellas evolucionadas.

NEBULOSA SHARPLESS 308

Cuando cursaba el último año del instituto, me quedaba tiempo por las tardes para pensar en qué iba a estudiar. ¿Qué quería ser "de grande"? Recuerdo que casi todas las tardes me subía al techo de mi casa para poder extender las manos o en algunos casos saltar para alcanzar el árbol de mangos que tenían los vecinos en el patio de su casa, los cuales me devoraba acostado viendo el cielo. Sinaloa se encuentra en la costa del Pacífico con una orientación casi perpendicular a la puesta del Sol, así que tiene un cielo y unos atardeceres espectaculares. Al ver aparecer las estrellas en el firmamento comencé a preguntarme sobre ellas, ¿Qué se sabía? ¿Cómo se formaron? ¿Se mueren las estrellas?

Este tiempo fue crucial para mí, porque fue cuando decidí que quería estudiar una licenciatura en física para luego ser astrónomo. Cursé física en la Universidad Autónoma de Sinaloa en Culiacán para luego en enero de 2008 trasladarme a Morelia (Michoacán, en la parte sur-centro del país) para estudiar una maestría en lo que era antes el Centro de Radioastronomía y Astrofísica de la UNAM. Allí trabajé en el desarrollo de simulaciones por computadora sobre la formación de nebulosas alrededor de estrellas Wolf-Rayet. Estas estrellas poseen los vientos estelares más potentes del universo y esta interacción con el medio interestelar forma patrones de choque que pueden ser detectados por diferentes telescopios. En particular a mí me interesaba reproducir la emisión de rayos X de una nebulosa, Sharpless 308 (S308). Los vientos estelares de estos objetos, que alcanzan velocidades de más de mil quinientos kilómetros por segundo (o sea vas de Málaga a Berlín en menos de una milésima de segundo) chocan y producen gas a millones de grados, de modo que son fácilmente detectados por telescopios espaciales de rayos X.

Recuerdo que en el verano de 2009 planeaba ir a Granada de vacaciones donde iba a visitar a una amiga que hacía su tesis doctoral en el IAA. Cuando le conté a mi entonces directora de tesis de maestría, me sugirió hablar con Martín Guerrero, investigador del IAA, para que me enseña ra a reducir los datos no publicados de rayos X de S308 obtenidos con el telescopio espacial XMM Newton de la Agencia Espacial Europea. Recuerdo que cuando llegué a Granada caí rendido a los pies de esta ciudad. Así que decidí que tenía que venir a vivir la experiencia granadina y comencé mi tesis doctoral con Martín. Durante mi tesis doctoral no solo aprendí a reducir los datos de S308 sino que me centré en estudios de la emisión de rayos X de nebulosas planetarias, esas nebulosas que representan la última configuración del medio circunestelar de estrellas como nuestro Sol. Estas producen emisión de rayos X de manera muy similar a las nebulosas Wolf-Rayet. Los estudios observacionales resultados de mi tesis doctoral sirvieron para entender el impacto que tiene la evolución estelar sobre el medio interestelar alrededor de estrellas evolucionadas.



La nebulosa Sharpless 308. Fuente: ESA, J. Toala & M. Guerrero (IAA-CSIC), Y.-H. Chu & R. Gruendl (UIUC), S. Arthur (CRyA–UNAM), R. Smith (NOAO/CTIO), S. Snowden (NASA/GSFC) y G. Ramos-Larios (IAM).

DE REGRESO A MÉXICO

Después de un poco más de cuatro años en Granada y de dos años de contrato posdoctoral en Taipei (Taiwán), regresé a México para trabajar en el (ahora) Instituto de Radioastronomía y Astrofísica (IRyA). Allí soy investigador asociado de tiempo completo y estoy involucrado directamente en el posgrado. Junto con otros investigadores del IRyA he fundado el primer grupo de Evolución Estelar, en el que discutimos temas relacionados con el impacto de las estrellas en el medio interestelar durante su evolución. Dirijo tesis de maestría y doctorado de estudiantes que realizan estudios teóricos y observaciones de nebulosas planetarias y nebulosas Wolf-Rayet. Además de mis actividades como investigador estoy muy involucrado en actividades de divulgación. Soy fundador y organizador del ciclo de charlas llamado *Astronomía en La Jacaranda*. La Jacaranda es un centro de actividades culturales localizado en Pátzcuaro (Michoacán), situada a sesenta kilómetros de Morelia. Pátzcuaro es el nombre de la ciudad y el lago donde se organiza una de las fiestas más bonitas de México, la noche de muertos. Es un lugar lleno de cultura e historia, pero debido a que es un lugar mayormente pobre, el alcance de la ciencia es casi nulo.

NUEVOS PLANETAS DESDE EL OBSERVATRIO DE CALAR ALTO

EL ESPECTRÓGRAFO CARMENES, CODESARROLLADO DESDE EL INSTITUTUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA Y QUE OPERA DESDE CALAR ALTO, ESTÁ PROPORCIONANDO EXCITANTES HALLAZGOS EN LA BÚSQUEDA DE PLANETAS MÁS ALLÁ DEL SISTEMA SOLAR

UN ANÓMALO SISTEMA PLANETARIO QUE DESAFÍA NUESTRA COMPRENSIÓN DE CÓMO SE FORMAN LOS PLANETAS

El instrumento CARMENES ha hallado en torno a la estrella enana roja GJ3512 un planeta gigante gaseoso, así como indicios de la presencia de otro. El hallazgo, publicado en la revista *Science*, pone en tela de juicio el modelo de formación de los planetas gigantes más aceptado, que afirma que nacen a partir de un núcleo sólido que va acumulando gas, y abre la posibilidad de que se formen tras la ruptura en fragmentos de un disco protoplanetario.

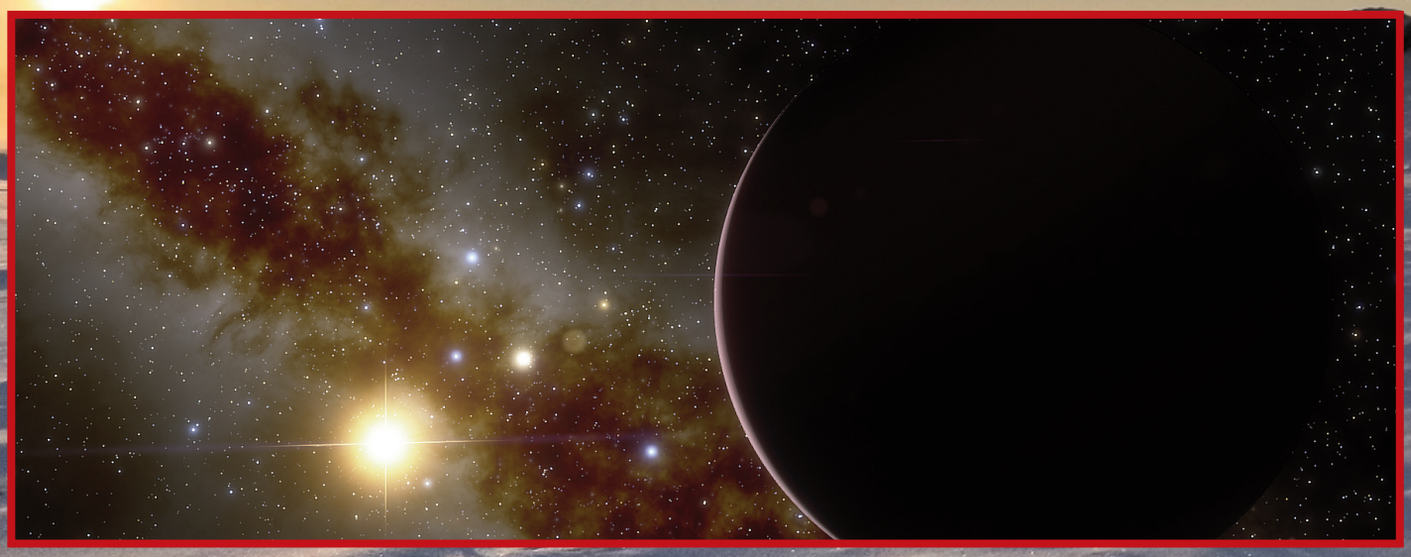
A día de hoy, existe un modelo de formación de planetas gigantes que explica el nacimiento de Júpiter y Saturno en nuestro Sistema Solar, así como el de muchos otros planetas gigantes gaseosos descubiertos alrededor de otras estrellas. Conocido como "modelo de acumulación de núcleos", plantea que el proceso comienza con la formación de núcleos rocosos de unas pocas masas terrestres dentro del disco protoplanetario que rodea la estrella; cuando se alcanza una masa crítica, comienzan a acumular grandes cantidades de gas hasta que alcanzan la masa de los planetas gigantes.

Sin embargo, este modelo no sirve para GJ3512. Las estrellas enanas muestran discos de baja masa, de modo que la cantidad de material disponible en el disco para formar planetas también se reduce significativamente.

La presencia de un gigante gaseoso alrededor de una estrella de baja masa indica que el disco original era anormalmente masivo, o que el modelo dominante no se aplica en este caso. Además, este planeta se halla en una órbita excéntrica, lo que suele interpretarse como el indicio de que, en el pasado, la interacción con otro planeta masivo produjo una alteración de la órbita (este segundo planeta habría sido expulsado del sistema como consecuencia).

El consorcio CARMENES trabajó en estrecha colaboración con varios grupos internacionales líderes en dinámica y formación planetaria, pero los modelos más actualizados no permitían la formación de un planeta como el hallado en torno a GJ3512, y mucho menos de dos.

Así se retomó otro posible escenario de formación de planetas, el "modelo de inestabilidad de disco", que defiende que los gigantes gaseosos pueden formarse directamente a partir de la acumulación de gas y polvo en el disco protoplanetario en lugar de requerir un núcleo "semilla". Un modelo que, hasta ahora, solo era compatible con un grupo reducido de planetas jóvenes, calientes y muy masivos situados a grandes distancias de su estrella anfitriona.



OBSERVACIONES DE SATÉLITE Y DESDE TIERRA PERMITEN HALLAR UN TRÍO PLANETARIO EN UNA ESTRELLA CERCANA

La combinación de datos del satélite TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*, NASA) con observaciones con detectores en tierra, entre ellos el espectrógrafo CARMENES, ha permitido hallar un sistema planetario triple en una estrella moderadamente brillante a tan solo treinta y un años luz de distancia, lo que lo convierte en un objetivo preferente para su estudio en detalle.

Los nuevos mundos giran en torno a GJ 357, una estrella enana de tipo M que presenta aproximadamente un tercio de la masa y tamaño del Sol. En febrero del 2019, las cámaras de TESS observaron cómo el brillo de la estrella se atenuaba ligeramente cada 3,9 días, lo que revelaba la presencia de un exoplaneta en tránsito (los tránsitos son mini eclipses producidos cuando los planetas pasan por delante de su estrella).

Un equipo internacional de astrónomos empleó datos de observatorios terrestres para confirmar la presencia del planeta y, durante ese proceso, descubrió dos mundos adicionales. Los tránsitos observados por TESS pertenecen a GJ 357 b, un planeta un 22% mayor que la Tierra que gira en torno a su estrella once veces más cerca que Mercurio del Sol. Sin tener en cuenta los efectos de calentamiento de una posible atmósfera, se trataría de una "tierra caliente", con una temperatura de unos 252 grados centígrados. Es demasiado caliente para albergar vida pero, siendo el tercer planeta transitante más cercano, se trataría de uno de los mejores candidatos disponibles para el estudio de las atmósferas exoplanetarias, una línea de investigación que ya afronta el instrumento CARMENES.

GJ 357 c tiene una masa de al menos 3,4 veces la de Tierra y gira alrededor de su estrella cada 9,1 días, a una distancia un poco más del doble que la del planeta en tránsito, lo que apunta a una temperatura de unos 128 grados. TESS no observó tránsitos de este planeta, lo que sugiere que su órbita se halla ligeramente inclinada con respecto a la órbita de la "tierra caliente", por lo que nunca transita sobre el disco de la estrella.

Por su parte, GJ 357 d, el planeta más lejano conocido del sistema, muestra una masa mínima de seis veces la terrestre, y orbita la estrella cada 55,7 días a una distancia equivalente al 20% de la distancia Tierra-Sol. El tamaño y la composición del planeta son aún desconocidos, pero un mundo rocoso con esta masa oscilaría entre una y dos veces el tamaño de la Tierra. Con una temperatura de equilibrio de unos 54 grados bajo cero, una atmósfera densa podría atrapar el calor suficiente para que exista agua líquida en su superficie.

"Este descubrimiento ilustra la potencia de la combinación de los datos espaciales y terrestres, permitiéndonos derivar la masa y densidad del planeta detectado por TESS, usando observaciones espectroscópicas obtenidas desde tierra, y revelar incluso la existencia de otros planetas, que de otra forma habrían pasado desapercibidos", señala Cristina Rodríguez López, investigadora del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que participa en el hallazgo.

DOS PLANETAS TEMPLADOS DE TIPO TERRESTRE ALREDEDOR DE LA ESTRELLA DE TEEGARDEN, UNA ENANA ROJA CERCANA

CARMENES ha permitido hallar dos planetas en torno a la estrella de Teegarden, una de las más cercanas conocidas. Con masas similares a la de la Tierra, sus temperaturas podrían ser lo suficientemente suaves como para albergar agua líquida en la superficie, según el estudio publicado en la revista *Astronomy & Astrophysics*.

Situada a una distancia de solo 12,5 años luz, la estrella de Teegarden es el sistema estelar número veinticuatro más cercano al nuestro, y una de las estrellas enanas rojas más pequeñas que se conocen. A pesar de su proximidad y debido a su bajo brillo, la estrella de Teegarden no fue identificada hasta el año 2003.

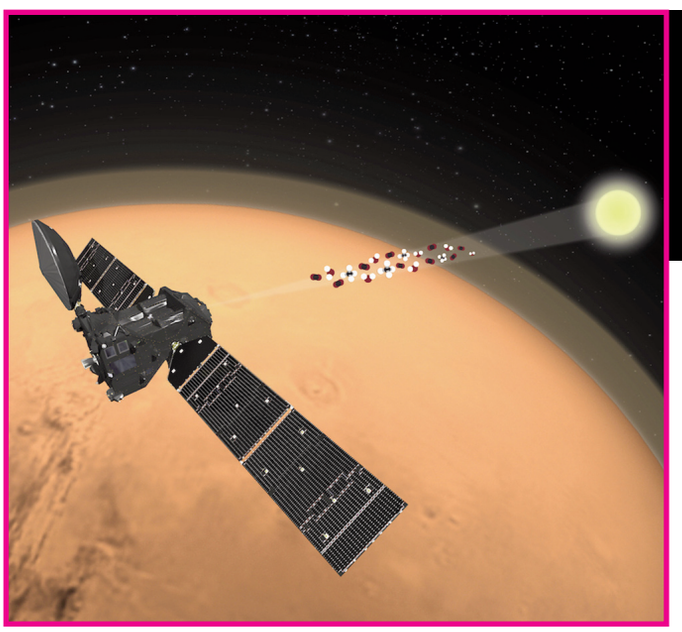
La temperatura de la estrella de Teegarden es de solamente 2.600 grados (casi la mitad de los 5.500 grados del Sol), es mil quinientas veces más débil y diez veces menos masiva que nuestra estrella. Como resultado, irradia la mayor parte de su energía en longitudes de onda rojas e infrarrojas, lo que la convierte en un blanco ideal para CARMENES, que opera simultáneamente en el visible y en el infrarrojo.

Las mediciones doppler de la estrella de Teegarden mostraron la presencia de al menos dos señales, ahora identificadas como los dos nuevos exoplanetas, denominados estrella de Teegarden b y c. La obtención de una detección sólida requirió la recolección de más de doscientas mediciones y, en función del movimiento medido, los investigadores han deducido que el planeta estrella de Teegarden b tiene una masa similar a la de la Tierra y completa una órbita en torno a la estrella cada 4,9 días a un 2,5 % de la distancia Tierra-Sol. Por su parte, estrella de Teegarden c es también similar a la Tierra en términos de masa, completa su órbita en 11,4 días y está situado a un 4,5 % de la distancia Tierra-Sol.

Dado que la estrella de Teegarden irradia mucha menos energía que nuestro Sol, las temperaturas en estos planetas deberían ser suaves y podrían, en principio, albergar agua líquida en la superficie, especialmente en el planeta más exterior, estrella de Teegarden c. Este tipo de planetas constituyen el objetivo principal para las futuras búsquedas de vida más allá de nuestro Sistema Solar. Los dos planetas pueden ser parte de un sistema más grande, ya que las estrellas de muy baja masa suelen tener sistemas planetarios densamente poblados.

Misión ExoMars: ausencia de metano en Marte y variaciones en el vapor de agua debido a las tormentas de polvo

EL ORBITADOR *TGO* DE LA MISIÓN *EXOMARS* (ESA-ROSCOSMOS) REVELA UNA SORPRENDENTE AUSENCIA DE METANO Y UNA RELACIÓN ENTRE LAS TORMENTAS DE POLVO Y EL VAPOR DE AGUA ATMOSFÉRICO



Concepción artística de *ExoMars-TGO* estudiando la atmósfera de Marte. Se describe el método de ocultación solar: los espectrómetros a bordo (ACS y NOMAD) observan cómo la luz solar es absorbida por la atmósfera para revelar las huellas químicas de sus ingredientes. Fuente: ESA/ATG medialab.

El orbitador *TGO* de la misión *ExoMars* (ESA-Roscosmos) comenzaba en abril de 2018 su misión científica desde una órbita a unos cuatrocientos kilómetros sobre la superficie de Marte. Esta distancia le permitió estudiar sin riesgo una tormenta de polvo que cubrió el planeta a los pocos meses y comprobar cómo el aumento de polvo afectaba al vapor de agua en la atmósfera, dato esencial para entender la historia del agua en Marte. La revista *Nature* publicaba estos resultados, así como las medidas de gases traza que apuntan a una carencia de metano en Marte.

"La presencia de dos instrumentos como NOMAD y ACS a bordo de la misión *Exomars-TGO* está permitiendo un conocimiento muy preciso de la atmósfera marciana, gracias a su diseño específico para medir la composición atmosférica y la distribución en altura de cada componente, en especial los compuestos minoritarios que juegan un papel fundamental en el comportamiento de la atmósfera de Marte –apunta José Juan López Moreno, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) y coinvestigador principal de NOMAD-.

CÓMO EL POLVO AFECTA A LA ATMÓSFERA

Las primeras medidas de alta resolución de NOMAD y ACS han permitido medir la distribución vertical del vapor de agua desde cerca de la superficie marciana hasta más de ochenta kilómetros de altura.

Solo podemos aportar un modesto límite superior que sugiere una ausencia global de metano en la atmósfera marciana

"En latitudes norte detectamos nubes de polvo a alturas de entre veinticinco y cuarenta kilómetros que no se encontraban allí antes, y en latitudes sur capas de polvo que se desplazaban a mayor altura –apunta Ann Carine Vandaele, científica del Real Instituto Belga de Aeronomía Espacial e investigadora principal del instrumento NOMAD–. El aumento de vapor de agua en la atmósfera ocurrió notablemente rápido, durante unos pocos días durante el inicio de la tormenta, lo que indica una reacción rápida de la atmósfera a la tormenta de polvo".

Las observaciones son consistentes con los modelos de circulación global: el polvo absorbe la radiación del sol, calienta el gas circundante y provoca que se expanda, lo que a su vez redistribuye otros ingredientes, como el agua, en un rango vertical más amplio. También se establece un mayor contraste de temperatura entre las regiones ecuatoriales y polares, lo que fortalece la circulación atmosférica. Al mismo tiempo, gracias a las temperaturas más altas, se forman menos nubes de hielo y agua, que normalmente limitarían el vapor de agua a altitudes más bajas.

Además, los equipos han estudiado por primera vez el agua "semipesada" (un tipo de agua con un átomo de hidrógeno reemplazado por un átomo de deuterio), simultáneamente con el vapor de agua. "Estas medidas son fundamentales para entender la evolución de Marte desde un clima cálido y húmedo en el pasado remoto hasta el actual clima seco y frío –señala Francisco González Galindo, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que participa en los trabajos–. Las abundancias de ambos compuestos en las capas altas de la atmósfera aumentan de manera significativa y muy rápida durante el desarrollo de la tormenta, lo que permite que el agua escape más fácilmente del planeta".

EL MISTERIO DEL METANO SE COMPLICA

Los dos instrumentos complementarios también comenzaron sus mediciones de gases traza en la atmósfera marciana. Los gases traza ocupan menos del uno por ciento en el volumen atmosférico total, y requieren técnicas de medición altamente precisas. La presencia de gases traza se mide en "partes por mil millones" de volumen (ppbv) y, por ejemplo, en la Tierra se miden 1800 ppbv de metano, de modo que por cada mil millones de moléculas, mil ochocientas son metano.

El metano resulta interesante para los especialistas en Marte porque puede constituir una señal de la existencia de vida -en la Tierra el 95% del metano de la atmósfera proviene de procesos biológicos-, o de procesos geológicos. Como la radiación solar destruye las moléculas de metano en un plazo de pocos cientos de años, cualquier detección de metano a día de hoy

implica una liberación reciente, incluso si se produjo hace millones o miles de millones de años y permaneció atrapado en el subsuelo. Además, los gases traza se mezclan a diario y de manera eficiente cerca de la superficie del planeta, y los modelos de circulación del viento global indican que el metano se mezclará de manera uniforme en todo el planeta en pocos meses.

Los resultados sobre el metano en la atmósfera marciana se han debatido intensamente porque las detecciones han sido muy esporádicas en tiempo y en ubicación, y con frecuencia se encuentran muy cerca de los límites de detección de los instrumentos.

Mars Express (ESA) contribuyó en 2004 con una de las primeras medidas, que ascendía a 10 ppbv. Los telescopios terrestres también han aportado mediciones de hasta 45 ppbv, mientras que el rover *Curiosity* (NASA) sugería un nivel de metano que variaba con las estaciones entre aproximadamente 0.2 y 0.7 ppbv, con algunos picos mayores. Más recientemente, *Mars Express* observó un pico de metano un día después de una de las lecturas más intensas de *Curiosity*.

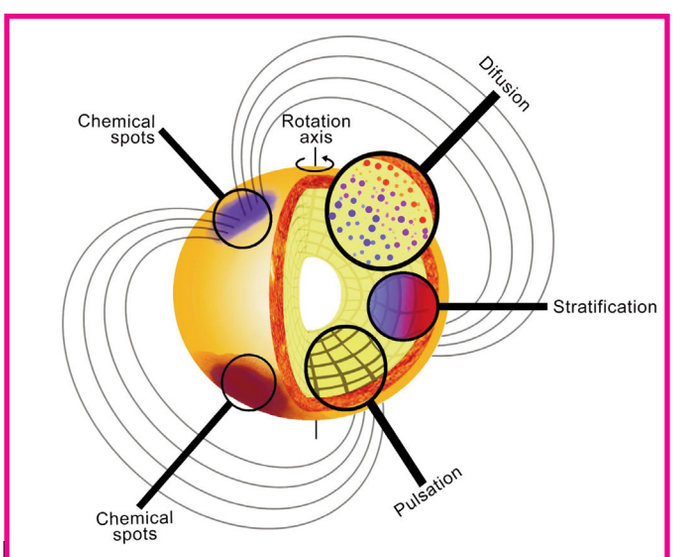
Los nuevos resultados de *TGO* proporcionan el análisis global más detallado hasta el momento, y presentan un límite superior de 0.05 ppbv, es decir, entre diez y cien veces menos metano que todas las detecciones anteriores. Como límite superior, 0.05 ppbv todavía corresponde a hasta quinientas toneladas de metano emitidas durante el ciclo de vida útil de trescientos años predicho para el metano, pero se trata de un valor extremadamente bajo.

"Tenemos señales de alta precisión para el rastreo de vapor de agua en el rango en el que esperaríamos encontrar metano, pero solo podemos aportar un modesto límite superior que sugiere una ausencia global de metano en la atmósfera marciana", concluye Oleg Korablev, científico de la Academia de Ciencias de Rusia y principal investigador del instrumento ACS.

Silbia López de Lacalle

Los primeros datos del satélite *TESS* arrojan luz sobre las estrellas roAp, las pulsantes extremas

LOS DATOS DE *TESS* HAN PERMITIDO HALLAR CINCO ROAP, UN TIPO DE ESTRELLAS RARAS QUE MUESTRA RÁPIDAS PULSACIONES, INTENSOS CAMPOS MAGNÉTICOS Y UNA COMPOSICIÓN QUÍMICA PECULIAR



Impresión artística de una estrella de tipo roAp, destacando su complejidad. La diversidad de los fenómenos físicos que tienen lugar en sus capas externas convierte a estas estrellas en los objetos idóneos para construir modelos de física estelar. Fuente: Victoria Antoci (Aarhus University).

La misión *TESS* (MIT-NASA), que examinará más de doscientas mil estrellas a lo largo de sus dos años de vida, constituye uno de los proyectos para la búsqueda de exoplanetas más importantes del momento. Pero sus datos también proporcionarán un punto de vista privilegiado de la física de las estrellas a través del estudio de sus pulsaciones. Un trabajo, en el que participa el IAA-CSIC, difunde los resultados de la primera luz del satélite, centrados en un tipo de estrellas peculiares y poco conocidas, las estrellas roAp.

Las estrellas muestran cambios periódicos en su superficie. Conocidos como pulsaciones (u oscilaciones), su estudio permite determinar la composición y estructura del interior estelar, así como su masa, densidad o edad. Un equipo internacional de astrónomos buscó pulsaciones en una muestra de cinco mil estrellas observadas en los primeros dos meses de observación de *TESS* y detectaron cinco estrellas de tipo roAp.

Estas estrellas, cuyo nombre procede de su rápido ritmo de oscilación ("ro", del inglés *rapidly oscillating*), son estrellas de tipo A, más masivas que el Sol, que muestran además campos magnéticos extraordinariamente intensos y una composición química peculiar, con sobreabundancia de algunos elementos pesados, como estroncio o cromo.

"Los datos de *TESS* muestran que menos del 1% de las estrellas de tipo A son pulsantes rápidas de tipo Ap. Sin embargo, el descubrimiento de estas estrellas puede contribuir en gran medida al modelado correcto de la evolución estelar, porque las estrellas roAp son bancos de pruebas únicos para el modelado de los procesos físicos responsables de la segregación de elementos químicos", señala Margarida Cunha, investigadora del Instituto de Astrofísica y Ciencias del Espacio portugués que coordina la investigación.

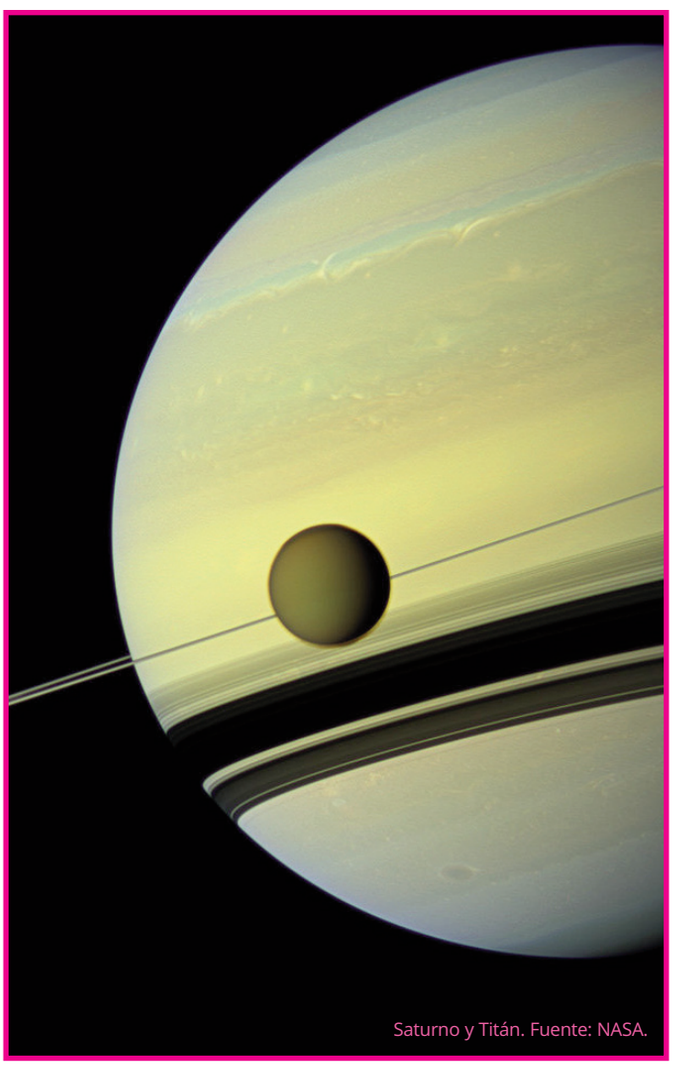
Entre las nuevas roAp descubiertas se encuentra la más rápida conocida, que completa una pulsación cada 4.7 minutos. Además, dos de estas cinco estrellas constituyen un desafío para la comprensión actual de este tipo de estrellas: una muestra una temperatura inferior a lo que le corresponde según los modelos y otra exhibe frecuencias de pulsación inesperadamente altas.

"Los datos ultraprecisos que proporciona *TESS* nos permiten concluir que no se trata de estrellas difíciles de observar, sino que son raras. Las observaciones que se presentan en este trabajo suponen retos de interpretación que urgen a revisar la teoría de pulsación de estrellas Ap", indica Javier Pascual IAA-CSIC que participa en la investigación.

Estos nuevos resultados han sido posibles gracias a que el satélite *TESS* observa las estrellas durante períodos de al menos veintisiete días y de manera continua, sin las perturbaciones que produce la atmósfera terrestre.

Vientos huracanados en la alta atmósfera de Titán

TITÁN ES EL ÚNICO SATÉLITE DEL SISTEMA SOLAR CON UNA ATMÓSFERA COMPLEJA, QUE SE CREE QUE SIMILAR A LA DE LA TIERRA PRIMITIVA. SE HAN DETECTADO VIENTOS MUY FUERTES Y CONFINADOS EN LA ALTA ATMÓSFERA DEL SATÉLITE, DONDE PARECÍA NO HABER ENERGÍA SUFICIENTE PARA DESENCADENAR VIENTOS TAN VELOCES


Saturno y Titán. Fuente: NASA.

Titán (NASA)

Titán, el mayor satélite de Saturno, constituye un objeto único: mayor que Mercurio, es el único objeto del Sistema Solar, además de la Tierra, que alberga dunas, ríos y lagos. Se trata además del único satélite que presenta una atmósfera densa, y cuenta con ciclo similar al hidrológico terrestre, pero controlado por metano. Un grupo internacional de astrónomos, con participación del IAA-CSIC, ha revelado otra peculiaridad inesperada de esta luna anaranjada: vientos muy confinados y veloces, de hasta trescientos cuarenta metros por segundo, soplan en la alta atmósfera, alimentados por ondas procedentes de la baja atmósfera.

LA LUNA CON ATMÓSFERA DE PLANETA

La densidad de la atmósfera de Titán supera la de la Tierra, y genera una presión sobre la superficie algo mayor que en nuestro planeta, similar a la del fondo de una piscina. Al igual que en la atmósfera terrestre, en la de Titán predomina el nitrógeno (98,4%), pero el resto de los componentes, como el metano (1,4%) y otros compuestos orgánicos, establecen grandes diferencias. Titán muestra, además, lo que se conoce como "súper rotación": rota muy lentamente –tarda dieciséis días terrestres para completar un giro sobre sí mismo–, pero sus vientos se mueven a mayor velocidad que la propia superficie (algo que también ocurre en Venus, pero a mayor escala).

"Los vientos en Titán se habían estudiado con anterioridad a través de distintos métodos –señala Luisa María Lara, investigadora del IAA-CSIC que participa en el trabajo–. Conocíamos que en la estratosfera soplan vientos muy fuertes, de hasta doscientos metros por segundo, que además variaban con la latitud y las estaciones, pero desconocíamos qué ocurría en las capas más altas, entre los quinientos y los mil doscientos kilómetros, lo que constituía una visión incompleta de la dinámica de la atmósfera de Titán".

VELOCES CORRIENTES DE CHORRO

Los investigadores observaron Titán con ALMA, un conjunto de antenas situado en el desierto de Atacama (Chile), centrándose en seis moléculas concretas presentes en la mesosfera y termosfera del satélite. "Vimos que los picos de emisión de estas moléculas estaban desplazados en frecuencia con respecto al valor teórico, lo que solo puede explicarse mediante un viento que transporta el material en las regiones sondeadas por las observaciones", explica Lara (IAA-CSIC).

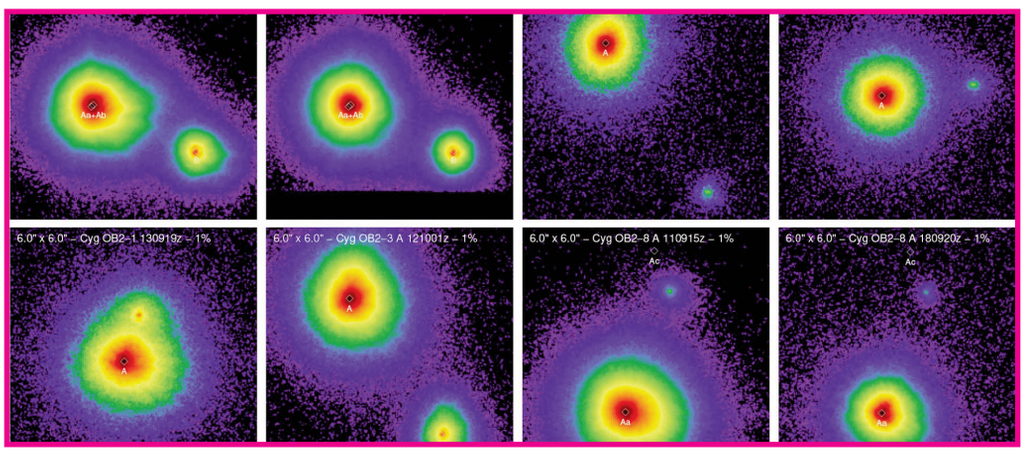
Se trata de vientos más veloces que los medidos en la baja y media atmósfera, que se extienden en altura a lo largo de la termosfera y cuya circulación se convierte, progresivamente, en una corriente de chorro (un flujo de aire muy rápido y estrecho), que alcanza los trescientos cuarenta metros por segundo a una altura de mil kilómetros (como comparación, los huracanes más potentes de la Tierra han generado vientos de unos cien metros por segundo como máximo).

Todas las observaciones y estudios realizados hasta la fecha apuntaban a un balance energético insuficiente para dar lugar a vientos veloces en esa región de la atmósfera, y hallarlos ha supuesto una sorpresa. La explicación que proponemos sugiere que ondas que se propagan verticalmente desde la estratosfera y mesosfera hacia arriba son capaces de depositar la energía a unos mil kilómetros. Esta energía, más la que aporta la radiación solar en el ultravioleta extremo (EUV), son las responsables de los vientos en esa región", concluye Luisa María Lara (IAA-CSIC).

Silbia López de Lacalle

Las estrellas muy masivas no se emparejan, sino que se agrupan en sistemas múltiples

EL PROYECTO MONOS ESTUDIA LOS SISTEMAS BINARIOS O MÚLTIPLES FORMADOS POR LAS ESTRELLAS MÁS MASIVAS



Varios de los objetivos del proyecto MONOS observados por la cámara Astralux, en el Observatorio de Calar Alto.

En nuestro entorno galáctico solo una de cada dos millones de estrellas es de tipo O, una clase cuyos objetos que tienen desde dieciséis a más de cien masas solares y una luminosidad de hasta varios millones de veces la del Sol. Estas estrellas, que culminan en explosiones de supernova, influyen de modo determinante en la estructura y evolución de las galaxias. Además, son las responsables de la existencia de, entre otros, algunos de los elementos que nos componen, pero su escasez dificulta su conocimiento. El proyecto MONOS se ha diseñado para recolectar y adquirir el máximo de información posible sobre un catálogo de estrellas O, y apunta en su primera fase que estos gigantes estelares tienden a agruparse en sistemas múltiples más que en parejas.

Una característica esencial de las estrellas de masa extrema reside en que casi nunca se hallan en solitario, sino que forman sistemas dobles, triples o múltiples de mayor orden. "Un rasgo afortunado que permite conocer la masa de cada una de ellas, pero también desafortunado porque varias estrellas próximas pueden parecer un único objeto desde nuestra perspectiva y porque estudiar este tipo de sistemas resulta técnicamente muy complejo", señala Jesús Maíz Apellániz (CAB-CSIC/INTA), investigador principal del proyecto.

El proyecto MONOS emplea datos de sondeos y catálogos anteriores, así como datos obtenidos con la cámara Astralux, que opera en el telescopio de 2.2 metros del Observatorio de Calar Alto. Astralux obtiene imágenes con una resolución próxima a la del telescopio espacial Hubble gracias a lo que se conoce como "imágenes afortunadas" (*lucky imaging*), que consiste en seleccionar las mejores fotografías de entre una serie obtenida a lo largo de varios minutos a un ritmo de varias decenas de tomas por segundo.

El proyecto MONOS ofrece información espectroscópica homogénea y actualizada sobre un catálogo de noventa y dos estrellas de tipo O binarias y múltiples. El espectro de un objeto celeste nos permite conocer sus características básicas, como la distancia, edad, luminosidad o incluso la tasa de pérdida de masa. Información muy necesaria en el caso de las estrellas de tipo O.

"A pesar de su manifiesta importancia, nuestro conocimiento de las estrellas de tipo O es todavía bastante incompleto –apunta Alfredo Sota, investigador del IAA que participa en el proyecto–. Si, como se piensa, la mayoría de estos objetos nacen en sistemas múltiples de periodo corto, muchos interactuarán entre sí. Un conocimiento preciso de las propiedades de estos sistemas binarios es crucial para comprender el papel que juegan las estrellas masivas como población dentro de las galaxias".

Se trata de un proyecto a largo plazo, que ampliará el catálogo de estrellas y estudiará los objetos para definir sus órbitas.

Este primer trabajo publicado dentro del proyecto MONOS concluye que la mayoría de las estrellas masivas solo tienen una compañera masiva cercana, pero que la tendencia clara se orienta hacia la formación de sistemas múltiples donde se incluyen estrellas de menor masa.

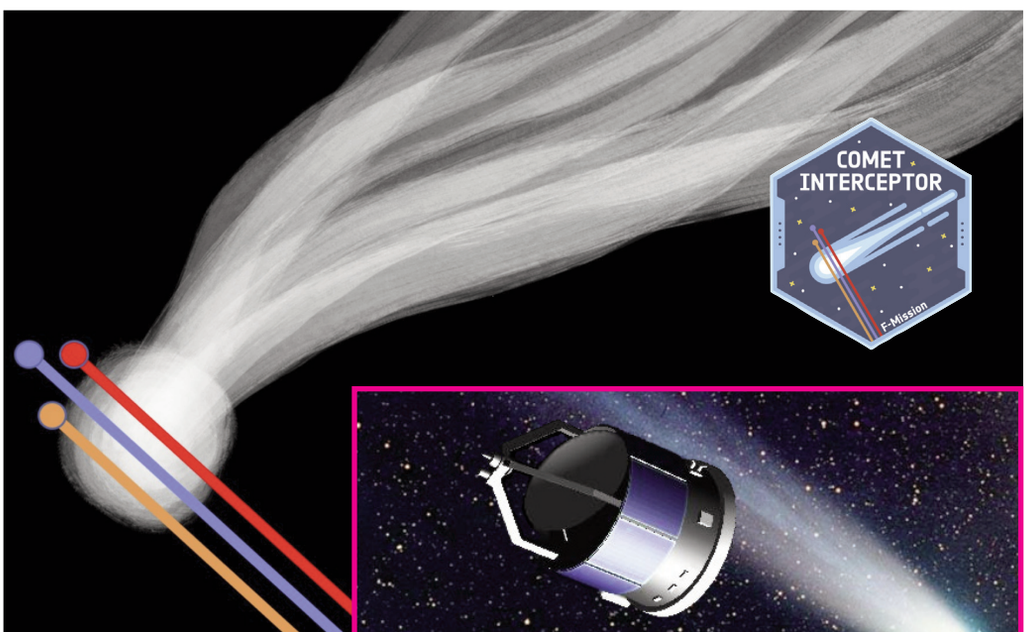
INVESTIGADORES DEL IAA, EN LOS "ÓSCAR DE LA CIENCIA"

El pasado 10 de abril se mostraba la primera imagen de un agujero negro, un hito científico que fue posible gracias a una extensa colaboración internacional en torno al Telescopio Horizonte de Sucesos, un telescopio a escala planetaria. Ahora, los 347 investigadores que participaron en el trabajo, entre ellos dos del IAA, han sido galardonados con el premio mejor dotado de la ciencia, el Breakthrough, en la categoría de Física Fundamental.

El premio, dotado con tres millones de dólares, será repartido entre los 347 miembros de la colaboración que participaron como coautores en los artículos científicos que mostraban el agujero negro supermasivo del centro de la galaxia Messier 87, situado a 55 millones de años luz de la Tierra. Múltiples observaciones independientes con el Telescopio Horizonte de Sucesos, analizadas cada una con distintos métodos de reconstrucción de imágenes, revelaban una estructura en forma de anillo con una región oscura central: la sombra del agujero negro. El galardón supone un enorme reconocimiento al carácter internacional de la colaboración del EHT, que engloba a más de sesenta instituciones en veinte países.

El IAA participa en *Comet Interceptor*, la nueva misión de la ESA para estudiar un cometa prístino

EL COMITÉ DE PROGRAMAS CIENTÍFICOS DE LA AGENCIA ESPACIAL EUROPEA HA SELECCIONADO *COMET INTERCEPTOR* COMO LA PRIMERA DE LAS MISIONES FAST, DENTRO DE SU PROGRAMA *COSMIC VISION*. EL IAA PARTICIPA EN LA MISIÓN, QUE HA SIDO SELECCIONADA ENTRE UN TOTAL DE VEINTITRÉS PROPUESTAS



Misión Giotto (ESA).

Misión Rosetta (ESA).

Comet Interceptor ha sido seleccionada como la primera misión *Fast* de la Agencia Espacial Europea (ESA) en su Programa *Cosmic Vision*. Con tres naves espaciales, será la primera misión que visite un cometa prístino, que apenas ha comenzado su viaje hacia el Sistema Solar interior y que conserva material no procesado que data de los albores de la formación del Sistema Solar.

La misión viajará a un cometa aún por determinar, y lo sobrevolará en su acercamiento hacia el Sol. Sus tres naves espaciales realizarán observaciones simultáneas desde múltiples puntos alrededor del cometa, creando por primera vez un perfil 3D de un objeto "dinámicamente nuevo". *Comet Interceptor* ampliará así los logros científicos de misiones predecesoras como *Giotto* o *Rosetta*.

Hasta ahora, todos los cometas estudiados desde misiones espaciales son cometas de corto periodo, es decir, objetos que se han acercado al Sol varias veces y que, por lo tanto, han sufrido modificaciones.

Estudiar un cometa verdaderamente prístino constituye un desafío porque estos objetos solo pueden detectarse cuando se acercan al Sol por primera vez, lo que reduce mucho el tiempo para planificar y lanzar una misión. Sin embargo, los avances tecnológicos ya permiten desarrollar misiones de estas características: una nueva generación de poderosos telescopios de reconocimiento está descubriendo estos cometas tan lejos que sí existe margen suficiente para que puedan constituir el objetivo de una misión espacial.

Comet Interceptor comprende tres naves espaciales. La nave esperará en el punto L2, situado a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra en dirección opuesta al Sol, a que el equipo científico detecte un objetivo adecuado. Cuando este se defina, viajará hacia él y los tres módulos se separarán unas semanas antes de interceptar el cometa. Cada módulo estará equipado con una carga útil científica complementaria, que brindará diferentes perspectivas del núcleo del cometa y su entorno de gas, polvo y plasma. Estas mediciones de "múltiples puntos" mejorarán en gran medida la información 3D necesaria para comprender la naturaleza dinámica de un cometa prístino mientras interactúa con el viento solar.

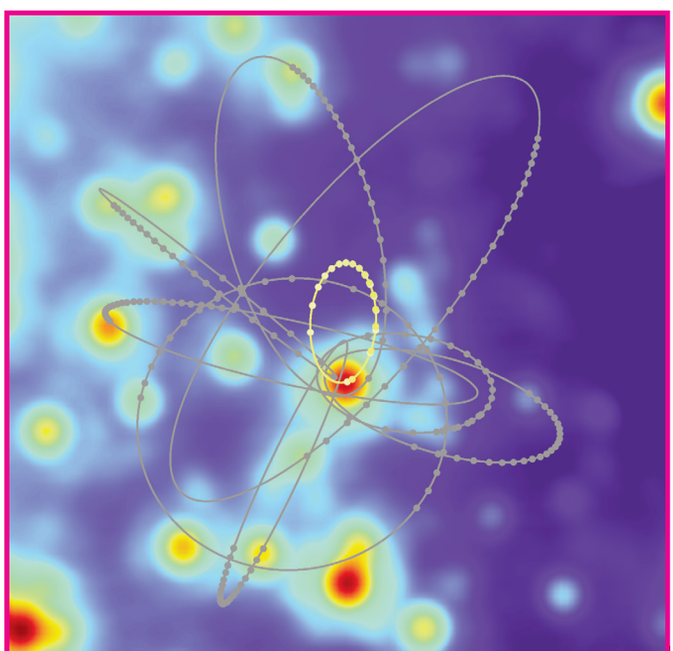
Comet Interceptor es una misión rápida, o clase F (*Fast*), lo que se refiere al tiempo de implementación, con una duración de desarrollo total desde la selección hasta el lanzamiento de aproximadamente ocho años. Las misiones clase F, que tienen una masa de lanzamiento de menos de mil kilos, compartirán el viaje al espacio con una misión de clase media, aprovechando el espacio adicional en el lanzador y el impulso al punto L2. *Comet Interceptor* se lanzará en 2028 junto a con la misión *Ariel* para el estudio de exoplanetas. Ambas misiones se enviarán a L2 y, desde allí, *Comet Interceptor* viajará hacia el objetivo elegido utilizando su propio sistema de propulsión.

En el equipo del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) involucrado en la misión participan Luisa M. Lara (investigadora principal), Daniel Guirado, Fernando Moreno, José María Castro, Miguel Herranz, Olga Muñoz y Pedro J. Gutiérrez.

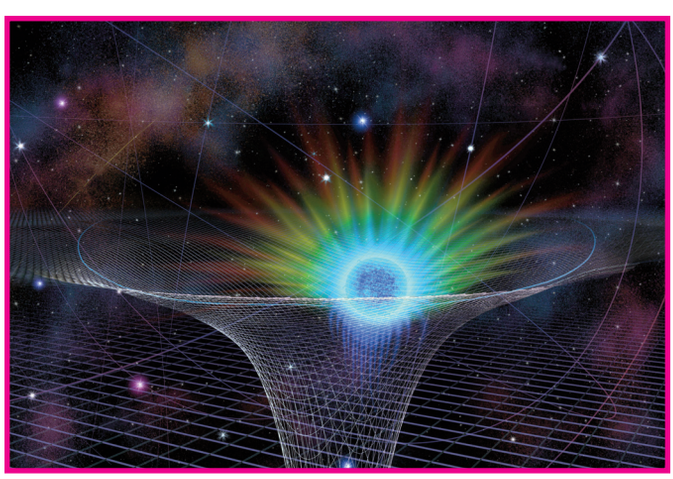
Una estrella alrededor del agujero negro de la Vía Láctea revalida la teoría de la relatividad de Einstein

LA ESTRELLA S2 DIBUJA UNA ELIPSE EN TORNO A SAGITARIO A*, EL AGUJERO NEGRO DEL NÚCLEO GALÁCTICO, Y SU SEGUIMIENTO A LO LARGO DE VEINTISÉIS AÑOS HA PERMITIDO ESTUDIAR LA GRAVEDAD EN ENTORNOS EXTREMOS

A 26.000 años luz de la Tierra, en las regiones centrales de la Vía Láctea, se halla Sagitario A*, un agujero negro supermasivo con una masa equivalente a unos cuatro millones de soles. Los agujeros negros son objetos tan compactos que ni siquiera la luz puede escapar de su influencia gravitatoria, y fue el estudio detallado de las órbitas de las estrellas cercanas lo que permitió conocer su masa. Ahora, una de esas estrellas, conocida como S2, ha permitido estudiar en detalle la gravedad en entornos extremos y confirmar la validez de la teoría de la relatividad de Einstein.



Órbitas de las estrellas más cercanas a Sagitario A*, con S2 destacada en amarillo. Keck/UCLA/Galactic Center Group.



EL ESPACIOTIEMPO

Einstein, en su teoría de la relatividad, mostró que el tiempo y el espacio, que siempre se habían considerado entidades diferenciadas, formaban en realidad una entidad única: el espaciotiempo. El espaciotiempo es el escenario en el que se desarrollan todos los eventos físicos del universo, y se trata de un tejido maleable, que se curva en presencia de materia. Esta curvatura es la causante de los efectos gravitatorios que rigen el movimiento de los cuerpos (tanto el de los planetas alrededor del Sol como el de los cúmulos de galaxias), y los agujeros negros supermasivos constituyen un entorno idóneo para verificar este efecto.

"Nuestras observaciones son consistentes con la teoría de la relatividad –apunta Andrea Ghez, investigadora de la Universidad de California (UCLA) que encabeza el trabajo-. Sin embargo, la relatividad no puede explicar completamente la gravedad dentro de un agujero negro, y en algún momento tendremos que ir más allá de Einstein, a una teoría de la gravedad más completa que explique estos entornos extremos".

Los resultados han sido posibles gracias a la estrella S2, que dibuja una elipse muy pronunciada en torno a Sagitario A* y que, en el punto de máximo acercamiento, se sitúa a tan solo unas tres veces la distancia que existe entre el Sol y Plutón. A esa distancia, y debido a la enorme fuerza de gravedad del agujero negro, la relatividad predice que los fotones (partículas de luz) deberían sufrir una pérdida de energía, lo que se conoce como desplazamiento al rojo gravitatorio. Y es, precisamente, lo que ha medido el equipo científico, confirmando un resultado publicado en 2018.

"Este tipo de experimentos está sujeto a un gran número de posibles errores, y desafortunadamente el equipo que difundió el resultado anterior no publicó todos los datos, algo que debería ser estándar hoy día –señala Rainer Schödel, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que participa en el trabajo-. Con este trabajo aportamos una comprobación independiente de un experimento extremadamente difícil, muy necesario en este caso, y aportamos todos los datos y los análisis estadísticos".

Los datos clave en la investigación fueron los tomados con el telescopio Keck (Hawái) durante los meses del máximo acercamiento entre la estrella y el agujero negro. Estos datos, en cuya obtención participó Eulalia Gallego (IAA-CSIC), se combinaron con las mediciones realizadas en los últimos veinticuatro años, lo que permitió obtener la órbita completa de la estrella en tres dimensiones y, a su vez, comprobar la validez de la relatividad general.

"Este resultado es un ejemplo claro del enorme potencial de centro galáctico como laboratorio no solo para estudiar los núcleos galácticos y su papel en la evolución de las galaxias, sino también para resolver cuestiones de física fundamental", concluye Rainer Schödel (IAA-CSIC), investigador principal del proyecto GALACTICNUCLEUS, que busca resolver cuestiones abiertas incrementando en más de cien veces nuestro conocimiento actual de la población estelar más cercana a Sagitario A*.

Silbia López de Lacalle

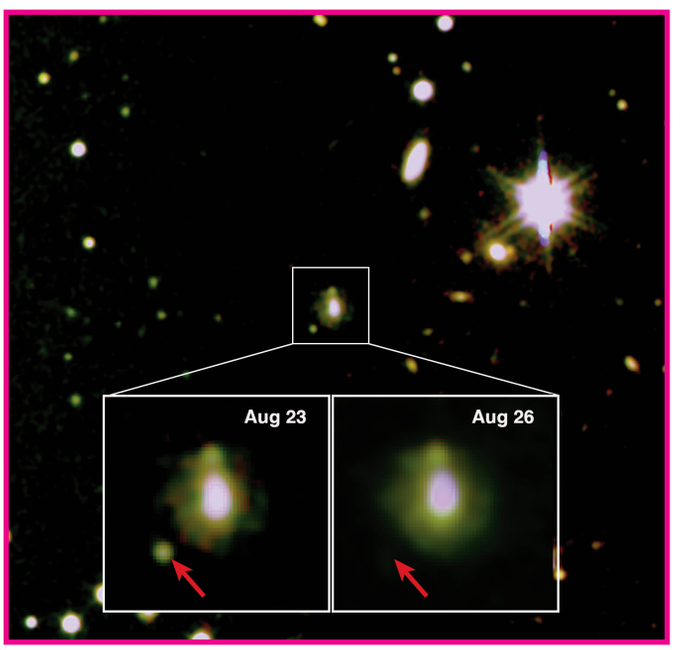
Una lejana colisión estelar con el brillo de los metales preciosos

SE HALLA, EN LOS DATOS DE UNA EXPLOSIÓN DE RAYOS GAMMA DE 2016, UNA FIRMA QUE COINCIDE CON LA EXPLOSIÓN PRODUCTORA DE ORO Y PLATINO OBSERVADA EN LUZ Y ONDAS GRAVITATORIAS EN 2017

El 17 de agosto de 2017 se anunciaba la primera observación de un evento cósmico en luz y en ondas gravitatorias: la fusión de dos estrellas de neutrones inauguraba una nueva era en la observación del universo y, además, proporcionaba la primera evidencia de que los elementos pesados, como el oro, el platino o el uranio, se producen en estos fenómenos. Ahora, un equipo internacional de astrónomos, con participación del IAA, difunde el hallazgo de un evento similar en 2016 que había pasado desapercibido.

Las estrellas de neutrones son objetos muy compactos y de rápida rotación que surgen cuando una estrella muy masiva expulsa su envoltura en una explosión de supernova. Las predicciones indicaban que una fusión de estrellas de neutrones produciría un estallido corto de rayos gamma (GRB), ondas gravitatorias y una kilonova, un fenómeno similar a las supernovas pero cuya energía procede en parte del decaimiento de especies radiactivas y que produce grandes cantidades de elementos pesados –de hecho, se cree que la mayor parte del oro y el platino en la Tierra se formaron como resultado de antiguas kilonovas–.

A partir de los datos del evento de 2017, detectado por primera vez por el instrumento LIGO, los astrónomos comenzaron a ajustar sus suposiciones sobre cómo debería aparecer una kilonova ante un observador terrestre. Un equipo dirigido por Eleonora Troja, de la Universidad de Maryland, reexaminó los datos de un estallido de rayos gamma detectado en agosto de 2016 y halló evidencias de una kilonova que pasó desapercibida durante las observaciones iniciales.



El evento de 2016 observado con el Gran Telescopio Canarias.

LA KILONOVA REDESCUBIERTA

"El evento de 2016 no coincidió con nuestras predicciones: esperábamos que la emisión infrarroja, cuya fuente es la producción de metales pesados, aumentara en brillo durante varias semanas, pero apenas diez días después del evento la señal se había extinguido", apunta Troja.

Sin embargo, los datos del evento LIGO de 2017 abrieron nuevas perspectivas. "Nos dimos cuenta de que habíamos capturado una kilonova en 2016. Era una combinación casi perfecta: los datos infrarrojos para ambos eventos tienen luminosidades similares y exactamente la misma escala de tiempo", concluye Troja (U. Maryland / NASA).

Las similitudes entre los dos eventos sugieren que la kilonova de 2016 también resultó de la fusión de dos estrellas de neutrones. Las kilonovas también pueden ser el resultado de la fusión de un agujero negro y una estrella de neutrones, pero se desconoce si tal evento produciría una firma diferente en las observaciones de rayos X, infrarrojos, radio y luz óptica.

"Aunque la información recopilada del evento de 2016 no contiene tantos detalles como la del evento LIGO, su detección temprana con el Gran Telescopio Canarias nos permitió observarla prácticamente desde los primeros minutos, lo que aportó ideas nuevas sobre las etapas iniciales de una kilonova", señala Alberto J. Castro-Tirado, investigador del IAA que participa en el hallazgo.

Por ejemplo, el equipo observó por primera vez el nuevo objeto que quedó después de la colisión, que no fue detectada en ondas gravitacionales al no estar operativo aún el detector LIGO de ondas gravitacionales en 2016. El remanente de esta colisión podría ser una estrella de neutrones hipermasiva altamente magnetizada conocida como magnetar, que sobrevivió a la colisión y luego se derrumbó en un agujero negro.

EL ORIGEN DE LOS ELEMENTOS PESADOS

Prácticamente todos los elementos químicos que conocemos tienen un origen astronómico, y se produjeron bien en etapas muy próximas al Big Bang, en las que se formaron el hidrógeno y el helio, o bien en las estrellas, tanto a través de la fusión de elementos en el núcleo (que producen carbono, nitrógeno o hierro) como a través eventos explosivos (en los que se generan el plomo o el cobre).

Sin embargo, existían discrepancias sobre lo que se conoce como proceso-r (o proceso rápido), que tiene lugar en eventos estelares explosivos y es responsable de la producción de la mitad de los elementos más pesados que el hierro, entre ellos el uranio y el oro. Aunque en un principio se pensaba que eran las supernovas la fuente de estos elementos, los últimos estudios favorecen las fusiones de estrellas de neutrones como principales productoras de los elementos más pesados.

Este trabajo abre la puerta para reevaluar eventos pasados, así como para mejorar el enfoque de las futuras observaciones. "La intensa señal infrarroja de este evento observada con el Hubble frente a la emisión óptica detectada con el Gran Telescopio Canarias, lo convierte posiblemente en la kilonova más clara que hemos observado en el universo distante, concretamente en una galaxia espiral a 2.500 millones de años luz. A medida que observemos más eventos de este tipo podremos estudiar cómo cambian los restos finales o las propiedades de la kilonova dependiendo de sus progenitores, y aprender que hay tipos diferentes de kilonovas, como es el caso de los distintos tipos de supernovas", concluye Castro-Tirado (IAA-CSIC).

Redescubriendo el Quinteto de Stephan

UN TRABAJO DE INVESTIGADORES DEL IAA-CSIC OFRECE NUEVOS RESULTADOS SOBRE EL QUINTETO DE STEPHAN, UNO DE LOS SISTEMAS COMPACTOS DE GALAXIAS MÁS PARADIGMÁTICOS

Un equipo de investigadores del Instituto de Astrofísica de Andalucía ha completado un profundo estudio del Quinteto de Stephan, un paradigmático grupo compacto de galaxias en interacción.

Para ello, han empleado el interferómetro óptico SITELLE, un instrumento revolucionario instalado en el *Canada-France-Hawaii Telescope* (CFHT), un telescopio de 3,58 metros de diámetro del Observatorio de Mauna Kea en las cumbres de la isla de Hawái.

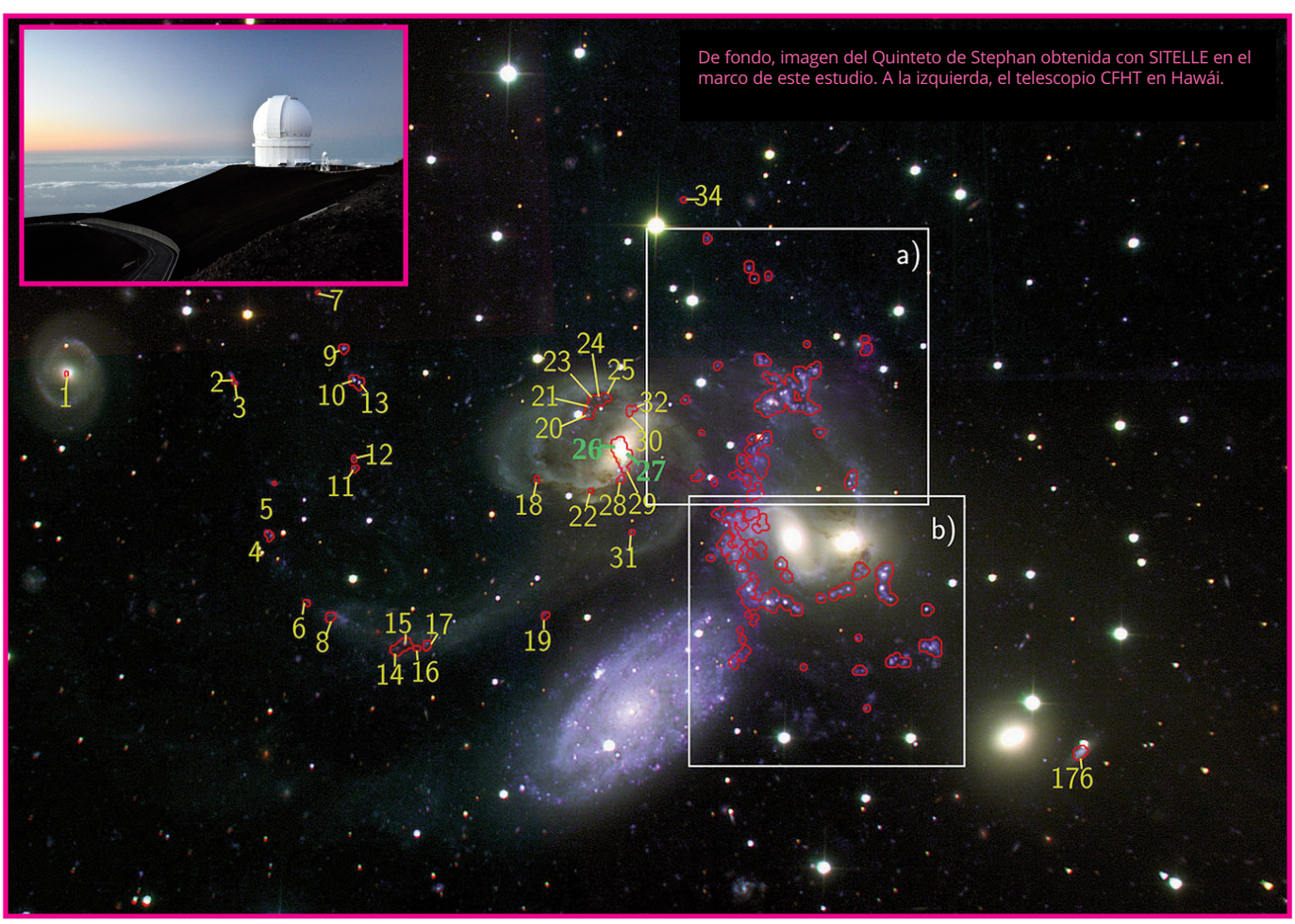
El gran campo de visión que ofrece este instrumento (once por once minutos de arco) junto a su amplia cobertura espectral, lo hacen único a la hora de estudiar los entornos galácticos más densos del universo local. Precisamente, sistemas compactos como el Quinteto de Stephan son clave para entender el efecto de las interacciones extremas en la evolución de las galaxias desde épocas tempranas del universo.

"Es la primera vez que se utiliza SITELLE para estudiar un sistema tan complejo como los grupos compactos de galaxias. Gracias a SITELLE hemos podido desentrañar por primera vez a gran escala el complejo entramado de estructuras originadas como fruto de las interacciones entre las galaxias del quinteto, lo que nos ha permitido esclarecer diversos aspectos clave de su formación y evolución", apunta Salvador Duarte, investigador del IAA-CSIC y primer autor del trabajo.

La potente combinación de SITELLE y del telescopio CFHT ha permitido a los autores desvelar estructuras de muy bajo brillo superficial, desconocidas hasta la fecha y mayormente distribuidas fuera de las galaxias del sistema, obteniendo así la mayor muestra de nubes intergalácticas ionizadas del quinteto. Estos objetos han permitido reconstruir la historia química del grupo y derivar las propiedades de su componente gaseosa.

"Otra de las sorpresas del estudio ha sido el inesperado descubrimiento de una nueva galaxia enana que, tarde o temprano, acabará interaccionando con el resto del grupo. Esto llevaría al sistema a ser considerado como sexteto", comenta Duarte.

El trabajo, publicado en colaboración con la Université Laval de Quebec, Canadá, y la EEZA-CSIC, fue seleccionado para la portada de la revista *Astronomy and Astrophysics* en su número de septiembre.



De fondo, imagen del Quinteto de Stephan obtenida con SITELLE en el marco de este estudio. A la izquierda, el telescopio CFHT en Hawái.

Por Enrique Pérez Montero (IAA-CSIC)

La inclasificable materia oscura

PILARES

Siempre resulta embarazoso para un científico explicar y tratar de describir algún aspecto de la naturaleza en el que prima más lo que se desconoce que lo que se sabe, aunque también resulta un ejercicio de humildad y consciencia de las propias limitaciones de nuestra especie para comprender lo que nos rodea y, por extensión, de la ciencia misma. Yo voy a tratar de hacerlo con uno de los temas más difíciles y controvertidos que hay en la actualidad, la materia oscura. Se cumplen ya ciento cincuenta años del establecimiento de la tabla periódica de los elementos, aquella que clasifica los constituyentes básicos de la materia y que resulta imprescindible para tratar de comprenderla. Así que no deja de resultar una paradoja que los astrónomos hayamos descubierto que más de un 80% de todo lo que hay en el universo y siente la fuerza atractiva de la gravedad está probablemente fuera de esta tabla que todo lo comprende en nuestro entorno más próximo.

El inicio de este problema aún por resolver comenzó en 1933, cuando el astrónomo suizo Fritz Zwicky midió las velocidades a las que se desplazaban las galaxias pertenecientes a grandes cúmulos de galaxias lejanos. Como la fuerza de la gravedad es universal, a pesar de que las escalas que involucran estos movimientos son mucho mayores que las de nuestro propio Sistema Solar, las ecuaciones que relacionan estas velocidades con las masas que las causan son las mismas. Zwicky llegó a la conclusión de que la proporción entre la masa real de esos cúmulos de galaxias y la que se podía calcular a partir de la luz emitida por sus estrellas eran muy diferentes, hasta el punto de que los cúmulos parecían estar compuestos en una proporción de quinientos a uno por algo invisible que él denominó *dunkle materie*, es decir, materia oscura. Por la misma época, Horace Babcock hizo las primeras y pioneras medidas de las velocidades de rotación de las estrellas en torno al centro de la galaxia de Andrómeda en zonas lo bastante alejadas, llegando a la conclusión de que la distribución de masa en el disco se extiende mucho más allá de donde se ve la luz.

Durante varias décadas los trabajos de Babcock y, sobre todo, de Zwicky, que era algo estrafalario aunque, en muchos aspectos, adelantado a su tiempo, fueron ignorados, hasta que otros resultados empezaron a confirmar sus hipótesis ya en la década de los años 1970. Entre ellos, la excesivamente elevada velocidad con que la galaxia de Andrómeda se aproxima a la nuestra, lo que llevó a Ostriker, Peebles y Yahil a recuperar la materia oscura como argumento, o las curvas de rotación planas medidas por Vera Rubin en una muestra representativa de galaxias, lo que demostraba ya de manera convincente la naturaleza ubicua de halos de materia oscura mucho más allá de los radios luminosos de todas las galaxias. En esa época ya se estableció que la proporción global de materia oscura era entre cinco y diez veces superior a la de la materia ordinaria, dependiendo de la cantidad de materia ordinaria no visible.

Más recientemente se han añadido evidencias que ponen aún más de manifiesto la existencia de la materia oscura, como es el caso del llamado Cúmulo Bala, que en realidad son dos cúmulos de galaxias en colisión observados en 2004 en rayos X y que muestran que los centros de gravedad están alejados de la posición del gas caliente, donde se halla la mayoría de la materia bariónica, y en cambio se encuentran donde están las escasas estrellas formadas a causa de la colisión y, por tanto, donde está la materia oscura. Se ha denominado a este peculiar objeto como piedra Rosetta de la materia oscura por la cantidad de elementos que, por separado, muestran su auténtica naturaleza gravitatoria.

Imagen compuesta que muestra el cúmulo de galaxias 1E 0657-56, más conocido como el Cúmulo Bala. La superposición rosa muestra la emisión de rayos X (registrada por el Telescopio Chandra) de los grupos en colisión, y la azul representa la distribución de masa de los grupos calculada a partir de los efectos de lentes gravitacionales. Fuente: NASA/CXC/M. Weiss.

Incluso se da la circunstancia de que en ciertos cúmulos podemos aprovechar la luz para evidenciar la presencia de la materia oscura. A pesar de que la radiación electromagnética no interacciona de ninguna manera con esta materia tan peculiar, pues no la emite, la absorbe o la difracta, la luz también puede estar sometida al influjo de la gravedad, como ya nos enseñó Albert Einstein con su teoría de la relatividad general. Esto es justo lo que se observa en ciertos cúmulos de galaxias, que curvan de manera mucho más acusada de lo que se podría esperar si estuvieran formados solo por estrellas o gas la radiación emitida por galaxias situadas detrás de ellas en nuestra línea de visión.

INCERTIDUMBRES

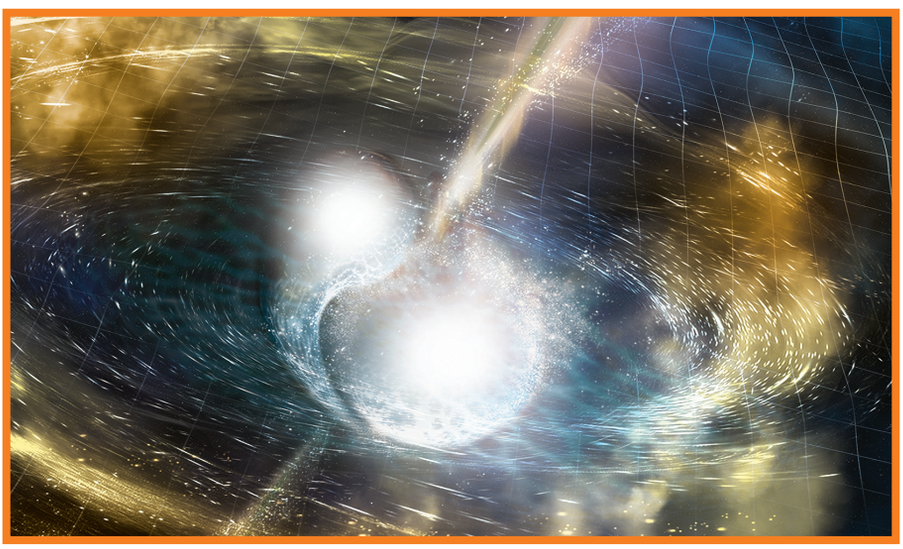


Ilustración del evento GW170817, producido por la fusión de dos estrellas de neutrones. La cuadrícula muestra las ondulaciones en el espaciotiempo (las ondas gravitatorias), mientras que los haces de luz estrechos representan los estallidos de rayos gamma (NSF/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet).

¿Y qué se piensa entonces qué es la materia oscura? La lista y variedad de candidatos es larga y ninguno de ellos termina nunca de descartarse completamente, así que hay muchas líneas de investigación abiertas. Dentro de esa lista se encuentran, por ejemplo, los objetos compactos que se encuentran en los halos de las galaxias (MAcHOS, de sus siglas en inglés) y que incluirían toda clase de cuerpos rocosos y estrellas oscuras que se podrían acumular en gran cantidad por encima del plano de los discos de las galaxias. No obstante, aunque se sospecha que se encuentran en gran número, su cantidad no bastaría para cubrir, ni de lejos, la materia requerida para explicar de manera convincente todos los efectos descritos más arriba.

Otra posible explicación para la materia oscura son los neutrinos, partículas predichas por el actual modelo estándar y que se generan en grandes cantidades en las reacciones nucleares que se producen en los interiores de las estrellas y tras el Big Bang. Su número es enorme y hace relativamente poco se ha determinado que tienen algo de masa, aunque mucha menos de la requerida, de nuevo, para dar cuenta de toda la materia perdida de las galaxias. Además, hay otra circunstancia que les hace ser malos candidatos para ser los componentes principales de los halos masivos de las galaxias, pues sabemos que las galaxias y los cúmulos de galaxias se formaron en un periodo relativamente breve después del Big Bang (unos mil millones de años después) a partir de las inhomogeneidades en la distribución de materia, por lo que esta no podía moverse a grandes velocidades y esto descarta a los neutrinos que se desplazan casi a la velocidad de la luz. Es por eso por lo que el actual modelo de formación del universo requiere materia oscura fría, es decir, casi en reposo.

Otra explicación alternativa sugiere que no estemos comprendiendo bien el comportamiento de la fuerza de la gravedad a grandes distancias y que, por eso, estemos prediciendo cosas irreales. El conjunto de teorías que afirman esto se engloba bajo el apelativo de dinámica newtoniana modificada. Muchos experimentos parecen descartar estas formulaciones alternativas a la dinámica de Newton y, sobre todo, a su actualización más aceptada tanto por la teoría como por la observación, que es la relatividad general de Einstein. El hecho más reciente que parece probar que esta es correcta vino del experimento LIGO, construido en Estados Unidos para la detección de ondas gravitatorias, logro que se consiguió por vez primera en 2015 tras la detección de la fusión de dos agujeros negros. Es más relevante sin embargo la más reciente detección de ondas gravitacionales con la fusión de dos estrellas de neutrones situadas en una galaxia a ciento treinta millones de años luz, en lo que se conoce como el evento GW170817. Esta detección es relevante porque LIGO detectó las ondas gravitatorias casi simultáneamente a la detección de una explosión de rayos gamma asociada al mismo evento. Esta coincidencia prueba que las ondas gravitatorias viajan a la misma velocidad que la luz, tal como predice la teoría de Einstein, lo que descarta la inclusión de términos escalares en la gravitación que tendrían como consecuencia un retardo en su emisión.

Parece pues que la posibilidad más prometedora viene de modelos y teorías aún no comprobados, como la existencia de partículas desconocidas y exóticas fuera del actual y aceptado modelo estándar y que reciben el nombre de WIMPs, acrónimo en inglés de “partículas masivas de interacción débil”. La posibilidad de que alguna de estas partículas, que deben de llenar todo el espacio, interaccione con alguna de las partículas conocidas provocando un estallido de energía debe ser prácticamente despreciable, pero no nula, por lo que hay toda una serie de experimentos tanto en órbita en torno a la Tierra como bajo tierra (a resguardo de los rayos cósmicos), buscando estas interacciones. Uno de ellos, el construido en Italia bajo el macizo granítico del Gran Sasso, ha sido capaz de detectar variaciones anuales en la incidencia de interacciones con un detector de cristales. Esta variación anual podría ser causada por el movimiento anual de la Tierra en torno al Sol, recibiendo una cantidad variable de colisiones con la materia oscura al cambiar la velocidad relativa de nuestro planeta con respecto al halo en torno a nuestra galaxia. No obstante, este resultado no ha sido reproducido por ningún otro experimento de modo que se desconoce si podría ser causado por la peculiar sección eficaz de este experimento o por otro factor. Sin duda, una cuestión apasionante que seguirá ofreciendo respuestas en los próximos años.

AGENDA ...

CONFERENCIAS DE DIVULGACIÓN EN EL IAA CICLO LUCAS LARA

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

http://www.iaa.es/lucas_lara

DESTACADOS ...

EL ENIGMA AGUSTINA, PREMIO PRISMAS DE DIVULGACIÓN

El Enigma Agustina: contar una historia desde la radio, el cine y el teatro es un proyecto que desarrolla el guion y las ideas del documental *El enigma Agustina* a través de un triple formato, empleando las herramientas y posibilidades de la radio, el cine y el teatro. Desarrollado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía, ha obtenido el Premio Prismas en su edición de 2019 al mejor proyecto singular.

https://vimeo.com/259681967

DESGRANANDO CIENCIA

Desgranando Ciencia es un evento de divulgación que busca llevar la ciencia al público general de forma amena y entretenida utilizando una gran variedad de formatos: charlas, talleres, espectáculos, cursos y concursos, entre otros. Organizado por la asociación Hablando de Ciencia, el IAA-CSIC participa como coorganizador y desarrolla el curso de técnicas de divulgación dentro de la programación.
Fechas: 20 al 23 de noviembre.

http://granada.hablandodeciencia.com/desgranando-ciencia-2019/

EL RADIOSCOPIO

radioscopio.iaa.es

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

CHARLAS DIVULGATIVAS PARA COLEGIOS

El IAA organiza charlas de divulgación astronómica para estudiantes, a petición de los colegios interesados. Pueden rellenar la solicitud en http://divulgacion.iaa.es/visitas_iaa