

# INFORMACIÓN Y ACTUALIDAD ASTRONÓMICA

<http://www-revista.iaa.es/>

OCTUBRE DE 2015, NÚMERO 47

Instituto de Astrofísica  
de Andalucía

¡cumplimos 40 años!

INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA  
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

<http://www.iaa.es>

Fondo: la protoestrella V164/Orionis, que se halla  
en uno de los extremos de la nebulosa McNeil.  
Fuente: Observatorio Gemini.

# Un poco de historia

La década de los setenta puede identificarse, sin lugar a dudas, como el momento en el que comienza el auge de la astronomía moderna en España. Los nuevos telescopios que se están fabricando entonces en Europa deben ser instalados en lugares excelentes para que la observación astronómica se lleve a cabo en óptimas condiciones, lo que coloca a nuestro país en una situación de privilegio. El Reino Unido, Alemania, Suecia y Holanda, entre otros países europeos, comienzan a interesarse por las condiciones astronómicas de algunas regiones.

Algunas zonas de las Islas Canarias y del Sureste de la Península destacan claramente entre un conjunto muy amplio de lugares potencialmente interesantes, y es en ellas donde comienzan a instalarse los grandes complejos observacionales europeos del Hemisferio Norte. La Palma, Tenerife, Almería y Granada

constituyen las respectivas sedes de los observatorios más importantes de Europa. Sin embargo, la situación de las actividades astronómicas en España era por entonces muy precaria, a pesar de que a mediados de los años sesenta se había iniciado ya un intento de modernización del sector. Tanto en Canarias como en la Península se habían llevado a cabo notables esfuerzos para tratar de revitalizar viejas instalaciones (caso de Granada con el Observatorio de Cartuja), o de reconducir otras más recientes hacia líneas de trabajo más novedosas y competitivas (caso de Canarias con el Observatorio del Teide). De cualquier forma, estas acciones se realizaron en condiciones muy poco favorables y su alcance no llegó a traspasar unos límites modestísimos que en nada hacían suponer un cambio tan importante como el que se produjo.

Este tipo de razones subyacía en el planteamiento que en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) se hacía a la hora de abordar la posible potenciación de una disciplina tradicionalmente muy modesta dentro del Patronato "Alfonso el Sabio", por entonces en pleno vigor. La existencia de pequeños y activos grupos de investigación en las Universidades de La Laguna y Granada resultó ser un factor decisivo a la hora de que el CSIC decidiese la creación de los Institutos de Astrofísica de Canarias (IAC) y Andalucía (IAA), con sedes en la Laguna (1974) y Granada (1975), respectivamente.

En lo que a Granada se refiere, el CSIC había venido apoyando desde los años sesenta un intento llevado a cabo por la Compañía de Jesús, propietaria del Observatorio de Cartuja. Este observatorio, fundado en 1902, disponía en esa época de una estación de montaña situada en Sierra Nevada, en el Mohón del Trigo, a 2.605 metros de altitud, que contaba con un pequeño telescopio Cassegrain de 32 centímetros de apertura que era utilizado conjuntamente con el *Royal Greenwich Observatory* para llevar a cabo estudios de fotometría estelar.

En 1972 se estableció un convenio entre la Compañía de Jesús y la Universidad de Granada, en virtud del cual el Observatorio de Cartuja pasaba a depender de la propia universidad.

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

La propuesta de creación del IAA, realizada por el CSIC en julio de 1975, tomaba en cuen-



ta esta situación y, apoyándose en ella, asumía, como uno de los factores clave para que el nuevo instituto pudiese adquirir una personalidad científica, la necesidad de disponer de medios propios de observación que, aunque modestos, pudieran permitir la realización de programas intensivos sobre líneas de investigación propias.

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

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

Después de múltiples dificultades, en febrero de 1976, el IAA encuentra una sede provisional en el Palacio de la Madraza de Granada,





edificio en el que Yusuf I creó en el siglo XIV la primera "Madraza" árabe, traducción islámica del concepto de Universidad al uso en la Europa cristiana, y que fue remozado posteriormente en función de los diferentes usos a los que fue adscrito a lo largo de la historia. En esta sede provisional el IAA continuó creciendo en personal contratado y becario, resolviendo con buen ánimo las muchas dificultades que en cada momento surgieron y llevando a cabo un trabajo que nadie duda en calificarlo como excelente, a la vez que enormemente generoso.

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

éxito la idea de instituto de investigación moderno que se pretendía.

Es de destacar también en esta etapa el enorme esfuerzo llevado a cabo para crear un grupo de instrumentación cuya finalidad era la de comenzar a trabajar en proyectos espaciales para medir in situ emisiones de la atmósfera por medio de cohetes de sondeo. Los resultados obtenidos desbordaron las mejores previsiones, iniciándose así tareas que hoy han sido ya plenamente acreditadas en nuestro instituto.

En 1978 el IAA se trasladó a uno de los edificios que el propio CSIC posee en Granada, situado dentro del complejo de la Estación Experimental del Zaidín (EEZ). La necesidad de poseer unas instalaciones observacionales propias se concretó en sendas negociaciones con el *Royal Greenwich Observatory* (RGO) y el *Observatoire de Nice* que finalmente fructificaron en sendos convenios entre el CSIC y el *Science & Engineering Research Council* (SERC) inglés, por una parte, y el propio CSIC con el *Centre Nationale pour la Recherche Scientifique* francés, por otra. Así,

el CSIC se comprometía a la construcción del Observatorio de Sierra Nevada (OSN) en la falda del Pico Veleta y las instituciones extranjeras en contrapartida cedían sendos telescopios, de 60 y 75 centímetros respectivamente, para ser instalados en dicho observatorio y ser explotados conjuntamente. Esta situación llevaba consigo también la necesidad de que el IAA se procurara nueva instrumentación, parte de la cual sería desarrollada dentro del propio instituto. Al mismo tiempo se fueron cimentando los esfuerzos ya realizados anteriormente con objeto de que las actividades del centro pudieran ser llevadas a cabo en instalaciones definitivas en la ciudad de Granada, específicamente adaptadas a las peculiaridades de un instituto de astrofísica volcado hacia el futuro. Así, el CSIC, finalmente, aprobó la construcción de un edificio en unos terrenos que la propia institución poseía, cerca de la carretera de acceso a Sierra Nevada, para así facilitar el acceso desde la ciudad de Granada al Observatorio. Este edificio fue inaugurado en 1986

y, desde entonces, ha ampliado ya sus instalaciones debido a las necesidades de todo tipo que han ido apareciendo.

La situación del OSN, aunque mejor que la que inicialmente se afrontó en el Observatorio de Cartuja, distaba mucho de ser satisfactoria, por lo que también en este campo se trató de conseguir una solución duradera, ya que no definitiva. Se empezó a pensar en disponer de instrumental básico de observación que fuese propiedad del instituto para que este pudiera llevar a cabo las tareas de investigación sin estar sometido a condicionamientos técnicos derivados por las cada vez más bajas prestaciones de los viejos telescopios disponibles.

La idea tomó cuerpo definitivamente cuando, después de unos contactos iniciales, se pudo precisar un programa en el que el CSIC y la Academia China de las Ciencias se comprometían a colaborar en la construcción de dos telescopios de 0,9 y 1,5 metros y los equipos de control correspondientes, en unas condiciones económicas muy favorables para el CSIC. Firmados los acuerdos en 1987, la instalación de los dos telescopios en el OSN comenzó en el verano de 1991.

Con la instalación de los dos nuevos telescopios se puso punto final a una primera fase de dotación de instrumental básico, colocando al IAA en disposición de afrontar los nuevos retos científicos y técnicos que le son propios.

# El universo desde Granada

Uno de los inconvenientes de la astrofísica, la imposibilidad de llevarse el objeto de estudio al laboratorio, sugiere una visión verdaderamente poética de esta disciplina: ¿no resulta sorprendente que sepamos qué hay dentro de las estrellas sin siquiera tocarlas? ¿O que conozcamos cómo era el Sistema Solar miles de millones de años antes de la aparición de la vida? ¿O incluso que seamos capaces de anticipar el futuro de nuestra Galaxia, la Vía Láctea, y del resto de galaxias? Los astrónomos han conseguido, a través de diversos medios, vencer la resistencia del universo a dejarse conocer. Hasta tal punto que presentar un centro de investigación como el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) obliga no solo a hablar sobre qué son los planetas, las estrellas y las galaxias, sino también sobre su posición, características y comportamiento, e incluso sobre su pasado y su futuro. Hacemos aquí un repaso, a modo de tráiler, de lo que se investiga en el IAA, que esperamos sirva para colocar las piezas en su lugar

## Nuestro vecindario

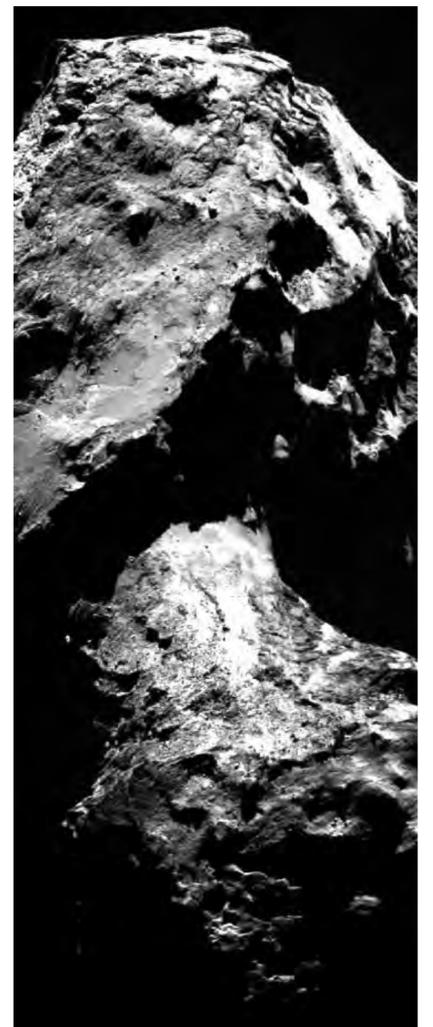
El Sistema Solar no presenta, ni remotamente, una distribución uniforme. Tenemos una estrella, el Sol, que aglutina más del 99% de la masa total del Sistema, cuatro planetas rocosos de tamaño más bien pequeño (Mercurio, Venus, Tierra y Marte), otros cuatro planetas gaseosos gigantes (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno), varios planetas enanos confirmados (Plutón entre ellos), cientos de miles de asteroides, más de cuatro mil cometas identificados y más de mil quinientos objetos helados situados más allá de Neptuno. Abrumador, ¿verdad? Pero constituye un vecindario bastante conocido: sabemos que el Sistema Solar se formó hace unos 4.600 millones de años a partir de una única nube de gas y polvo, que comenzó a concentrarse y a rotar hasta aplanarse en forma de disco en cuyo centro, la región más densa y caliente, nació el Sol.

A su alrededor se crearon pequeños grupos de gas y polvo, los llamados planetesimales, que poco a poco acumularon suficiente materia para convertirse en planetas, rocosos en las regiones internas y cálidas, y gaseosos en las regiones externas y frías. Encontramos un ejemplo de este proceso en lo que hoy conocemos como cinturón de asteroides, un conjunto de cuerpos rocosos situados entre Marte y Júpiter que constituyen los restos de un planeta que no llegó a formarse debido a la fuerza gravitatoria de Júpiter. Y también quedaron algunos "escombros" en las regiones más externas del Sistema, que forman el cinturón de objetos transneptunianos (o cinturón de Kuiper) y, mucho más lejos, la nube de Oort, una burbuja que rodea todo el Sistema Solar y que puede contener millones de cometas.

Dada su proximidad, el estudio de este complejo vecindario se acomete de diversas

formas: el IAA ha participado, por ejemplo, en *Mars Express* y *Venus Express*, misiones espaciales de la Agencia Espacial Europea (ESA) que han sobrevolado Marte y Venus respectivamente; en *Cassini-Huygens* (NASA/ESA) que, además de sobrevolar Saturno, liberó un módulo que descendió sobre la superficie de Titán, una de sus lunas; y en *Rosetta*, una misión pionera al acompañar al cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko en su viaje hacia las regiones internas del Sistema Solar. El IAA ha participado en ellas tanto en la parte técnica (en electrónica o mecánica) como en el aprovechamiento científico de los datos obtenidos, y en la actualidad está colaborando en misiones con destino a Mercurio (*Bepi-Colombo*), Marte (*ExoMars*) y a Júpiter y sus lunas heladas (JUICE).

Y los datos que aportan estas misiones se combinan con estudios desde aquí, en Granada: por ejemplo, el IAA mantiene una in-



El cometa Churyumov-Gerasimenko, fotografiado por *Rosetta*. Fuente: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS-TeamMPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/ID



Las estrellas masivas WR 25 y Tr16-244.  
Fuente: NASA, ESA y Jesús Maíz Apellániz (IAA-CSIC).

Se han hallado más de dos mil planetas extrasolares en apenas dos décadas. Pero el desafío, a día de hoy, reside en hallar planetas como el nuestro. Este es el objetivo que comparten CARMENES, un instrumento que colidera el IAA, y PLATO (ESA), una misión en la que participan investigadores del centro

investigación muy activa sobre atmósferas planetarias, incluida la terrestre, que no solo busca responder a preguntas sobre su origen y evolución, sino que trata de comprender su comportamiento global, un sistema muy complejo en el que intervienen numerosos factores. Para ello desarrolla modelos teóricos, que aplica al análisis de los datos obtenidos con telescopios y satélites (como SABER o MIPAS), y cuenta con un laboratorio experimental que estudia cómo las partículas de polvo dispersan la luz, algo esencial para el estudio tanto de las atmósferas planetarias como de la envoltura de gas y polvo que rodea el núcleo de los cometas. El estudio de estos últimos, junto con los asteroides y el resto de “escombros” helados más allá de Neptuno, constituye una línea de investigación en el centro que busca comprender la historia del Sistema Solar: estos objetos son los bloques originales que, muy transformados, vemos hoy dar forma a cuerpos tan distintos como nuestro sólido planeta y el liviano Saturno, cuya densidad es tan baja que flotaría en el mar. Y nuestra estrella, el Sol, también es objeto de investigación en el centro: sabemos que tiene manchas (o regiones algo más frías), que sufre fenómenos violentos (que, además de producir las auroras boreales, pueden interrumpir las comunicaciones terrestres e incluso provocar apagones), y que su actividad se ciñe a un ciclo de once años. Y sabemos que todo ello se debe a su campo magnético, pero desconocemos con exactitud cómo funciona. Investigadores del IAA estudian ese motor de la actividad solar, y participan de manera destacada en misiones como *Sunrise* y *Solar Orbiter* (ESA).

### Estrellas: su interior, ciclo de vida y planetas

Según nos alejamos de nuestro Sistema Solar nos encontramos ante un drástico cambio de escala: el kilómetro, o incluso la Unidad Astronómica —la distancia de la Tierra al Sol, ciento cincuenta millones de kilómetros—, resultan ineficaces y tenemos que acudir a otras unidades de medida, como el año luz, para estudiar el universo. Y es que las estrellas se encuentran realmente lejos unas de otras: la luz de la estrella más cercana, Próxima Centauri, tarda cuatro años en llegar hasta nosotros, en tanto que la del Sol nos alcanza en apenas ocho minutos. Auguste Comte aseguraba, en 1825, que nunca conoceríamos las estrellas de otra forma que como inalcanzables puntos de luz en el cielo debido a su enorme distancia. Claramente, se equivocó.

Las estrellas son enormes esferas de gas (el radio del Sol es ciento nueve veces el de la Tierra, y es una estrella mediana), compuestas sobre todo por hidrógeno y helio, y que generan energía gracias a las reacciones termonucleares que se producen en su núcleo: el hidrógeno, su “combustible”, se convierte en helio en un proceso que genera energía. Esta energía se va haciendo camino hacia la superficie estelar y viaja enormes distancias hasta llegar a nuestros ojos.

En el IAA se estudian las estrellas desde muy diversos puntos de vista y a través de diferentes técnicas: se emplea la fotometría, que mide con precisión el flujo de luz de una estrella y sus posibles variaciones, la espectroscopía, una técnica que descompone su luz y permite estudiar su composición, temperatura o velocidad de rotación, y la astrosismología, que mide las oscilaciones en la superficie de las estrellas, un fenómeno parecido a los terremotos terrestres pero, en este caso, causado por el movimiento del gas en su interior (la misión internacional

CoRoT, en la que participó el Instituto de Astrofísica de Andalucía, empleaba esta técnica, que permite analizar la estructura interna de las estrellas). También se desarrollan herramientas teóricas que ayudan a comprender las observaciones y que se centran en aspectos específicos, como la rotación de la estrella, sus modos de oscilación o su estadio evolutivo.

Hablando de evolución, ¿saben que una estrella, después de nacer a partir de una nube de gas, pasa muchísimos años (entre millones y billones) en una etapa conocida como secuencia principal, y que después sufre cambios drásticos que la llevan a la muerte? En el IAA también se estudian esas primeras y últimas etapas de la vida de las estrellas, durante las que su interacción con el entorno, o con el medio interestelar, es significativa.

Se investiga el proceso de formación estelar y los distintos mecanismos que intervienen en él, desde la nube de gas original hasta la entrada en la etapa adulta, así como los momentos últimos, en los que la estrella, dependiendo de su masa, explotará como supernova o se convertirá en una nebulosa planetaria.

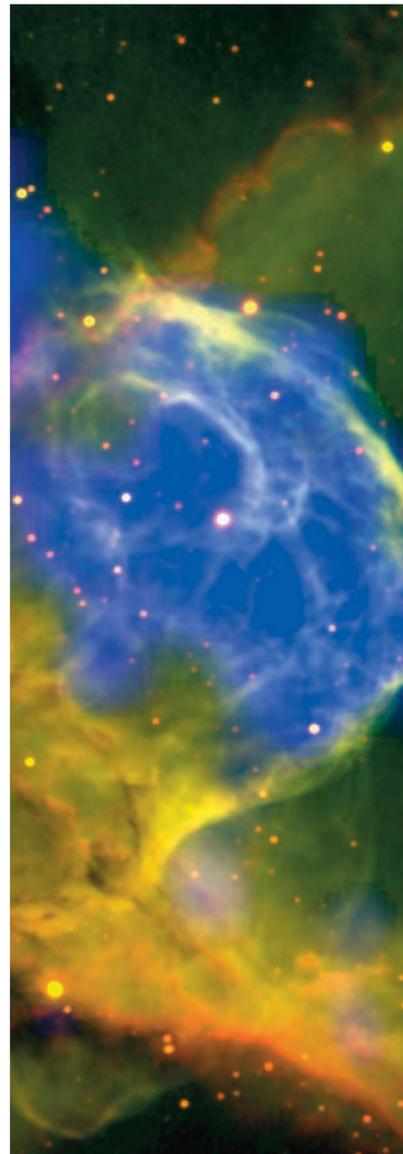
Algunas estrellas —las muy muy masivas, con unas treinta veces la masa del Sol—, producirán al morir uno de los eventos más energéticos conocidos, una explosión de rayos gamma (GRB, de su nombre en inglés). Se trata de intensos destellos de rayos gamma con una duración de entre una centésima de segundo y varios minutos, y que son tan impredecibles como escurridizos. Sin embargo, la combinación de la observación con satélites como Swift (NASA), con la

de telescopios robóticos de gran velocidad de apuntado, como los pertenecientes a la Red BOOTES, gestionada por el IAA, comienza a aportar luz a un fenómeno que, hace apenas diez años, constituía uno de los mayores enigmas de la astrofísica.

### De estrellas binarias a galaxias

Si queremos poner en contexto las estrellas, hay que hablar de cómo se agrupan. Además de formar sistemas binarios o múltiples (varias estrellas girando en torno a un centro común), existen dos tipos de agrupaciones estelares básicas: los cúmulos abiertos, compuestos por estrellas jóvenes y calientes, y los cúmulos globulares, que agrupan hasta millones de estrellas, aunque en este caso viejas y frías.

Y, si buscamos sociedades estelares aún mayores, llegamos a las galaxias. Las galaxias son conjuntos de estrellas, gas y polvo que se mantienen unidos por la fuerza de la gravedad y que presentan diferentes tamaños y formas. La nuestra, la Vía Láctea, es una galaxia espiral que contiene entre cien y cuatrocientos mil millones de estrellas y forma parte del cúmulo de galaxias llamado Grupo Local, que incluye también a Andrómeda y otras treinta galaxias de menor tamaño. Su interacción con las galaxias vecinas constituyó la pista inequívoca para dilucidar su origen: la Vía Láctea se formó por la fusión de varias galaxias enanas y no lleva una vida apacible y aislada, sino que sigue en proceso de “construcción”. La gran evidencia se halló en 1994, escondida tras las densas regiones centrales de la Vía Láctea: se trata de la galaxia enana de Sagitario,



Fragmento de la nebulosa conocida como el Casco de Thor.  
Fuente: J.A. Toalá y M.A. Guerrero (IAA-CSIC), Y.-H. Chu (UIUC/ASIAA), R.A. Gruendl (UIUC), S. Mazlin, J. Harvey, D. Verschate and R. Gilbert (SSRO-South) y ESA.

El IAA participa en Gaia, un satélite de la ESA que, durante cinco años, recogerá datos de mil millones de estrellas para construir el mapa en tres dimensiones de la Vía Láctea más completo jamás construido

que gira en torno a la Vía Láctea y que, se anticipa, no sobrevivirá a una órbita más y se fusionará con ella en unos setecientos cincuenta millones de años. Astrónomos del Instituto de Astrofísica de Andalucía estudian las poblaciones estelares de la Vía Láctea para desentrañar su estructura, para ahondar en su proceso de formación y evolución e incluso para ver lo que no se ve: a 26.000 años luz de la Tierra, en el centro la Vía Láctea, habita Sgr A\*, un agujero negro supermasivo cuya existencia, propuesta hace más de treinta años, no fue confirmada hasta finales del siglo pasado; los astrónomos observaron estrellas girando alrededor del centro galáctico a velocidades de mil quinientos kilómetros por segundo (cincuenta veces más rápido que la Tierra alrededor del Sol), y solo la fuerza gravitatoria de un agujero negro podría retener a estas estrellas en sus aceleradísimas órbitas. Se estima que, a lo largo de su vida, Sgr A\* ha devorado una cantidad de materia equivalente a más de dos millones de soles, aunque se queda pequeño comparado con otros agujeros negros supermasivos, como el de la galaxia M87, con una masa estimada de unos tres mil millones de soles. Los astrónomos saben que la mayoría de las ga-



Las nebulosas NGC 2068 y NGC 207. Fuente: Astroimagen e IAA.

Galaxias a partir de un cierto tamaño ocultan un agujero negro supermasivo en su centro y podría decirse que, mientras algunos se hallan en un estado de letargo, como Sgr A\*, otros están bien despiertos y activos. De hecho, el término “núcleos activos de galaxias” (AGNs, del inglés) designa a un grupo de galaxias cuya energía, muy superior a la que pueden producir sus estrellas, se halla concentrada en la región central, o núcleo. Se cree que es la materia existente en el entorno del agujero negro la que, en su proceso de caída, libera esa energía, pero los AGNs constituyen fenómenos muy complejos que aún presentan incógnitas: en algunos casos, por causas aún no del todo claras, se observan unos chorros de partículas que viajan casi a la velocidad de la luz y que emanan del núcleo. Se trata de los mayores aceleradores de partículas del universo, se conocen como jets relativistas e integran una línea de investigación dentro del IAA que se lleva a cabo mediante observaciones en diferentes longitudes de onda y con simulaciones numéricas, y que busca definir detalles sobre su estructura y composición y sobre cómo y dónde se generan.

## Galaxias por doquier

Ahora vamos a irnos muy lejos para apreciar el paisaje que forman las galaxias. Nuestro Grupo Local constituye una diminuta entidad dentro del universo, formado por miles de millones de galaxias que se agrupan en pares de galaxias, grupos de decenas de ellas, cúmulos de cientos y supercúmulos. Si pudiéramos hacerlo imposible y sacar una fotografía desde fuera del universo, veríamos una estructura a gran escala con una disposición curiosa: la distribución de galaxias en el espacio se muestra como una colección de vacíos gigantes con forma de burbuja, separados por películas y filamentos constituidos por galaxias, con los supercúmulos apareciendo ocasionalmente como

nodos relativamente densos.

La variedad de galaxias resulta abrumadora (enanas, gigantes, elípticas, espirales, irregulares, lenticulares, barradas y no barradas, activas y no activas, en grupos o solitarias), y además hay que considerar que, al mirar muy lejos, estamos contemplando el pasado del universo: la luz solar tarda ocho minutos en alcanzarnos, lo que supone que siempre vemos el Sol cuando era ocho minutos más joven; pero si trasladamos esto a las galaxias lejanas veremos que los telescopios muy potentes son, en cierto sentido, como máquinas del tiempo. De hecho, el Telescopio Espacial Hubble ha conseguido observar galaxias tan distantes que su luz ha tardado en alcanzarnos más de trece mil millones de años (el universo tiene una edad estimada de trece mil ochocientos millones de años, de modo que estamos hablando de la etapa en la que se formaron las primeras galaxias). Así que no solo podemos clasificar y estudiar las galaxias de nuestra época, sino que también podemos conocer cómo eran las generaciones anteriores.

En el Instituto de Astrofísica de Andalucía se investigan las condiciones necesarias para encender la actividad en los núcleos galácticos (o los factores que provocan que un agujero negro supermasivo salga de su letargo), así como el papel que juegan la actividad nuclear y el entorno en la evolución de las galaxias; también se estudian las estrellas muy masivas, cuyo aporte de energía e interacción con el medio resultan determinantes en la evolución de algunas galaxias, así como el medio interestelar y la relación entre la masa de las estrellas y su contenido en elementos pesados, ambos imprescindibles para entender la formación estelar.

## El todo...

Ya conocemos, más o menos, las partes, y llegamos al todo, a la cosmología, una rama de la astronomía que trata de las leyes generales, del origen y de la evolución del universo. Edwin Hubble demostró, en 1929, que las galaxias se alejan unas de otras y que además este desplazamiento aumenta con la distancia: cuanto más distantes, a mayor velocidad se alejan. Es lo que se denomina expansión del universo, un proceso que, si rebobinamos mentalmente, muestra las galaxias acercándose y apunta al origen de todo: a un instante, hace trece mil ochocientos millones de años, en el que toda la materia y energía estaba contenida en un punto infinitamente denso y pequeño que experimentó una violenta expansión, origen del tiempo, el espacio y todas las agrupaciones de materia. Es lo que se conoce como big bang y constituye, hasta la fecha, el esqueleto teórico que mejor explica el origen del universo en el que vivimos.

Quedan, sin embargo, muchas incógnitas: para comprender el universo y anticipar su evolución debemos tener en cuenta toda la materia y energía que lo compone, y un gran porcentaje de esta es invisible o completamente desconocida. Las últimas investigaciones indican que el universo se compone en un 68,3% de energía oscura, una fuerza repulsiva que provoca el progresivo (y acelerado) distanciamiento de las galaxias, en un 26,8% de materia oscura, un tipo de materia que no emite ni refleja luz y que solo puede detectarse por su acción gravitatoria, y en un frugal 4,9% de materia ordinaria, o el tipo de materia que forma las galaxias, las estrellas, los

planetas y nosotros mismos. Demasiadas cosas oscuras, ¿verdad? En el IAA se lleva a cabo un acercamiento a los problemas cosmológicos que incluye modelos teóricos, datos observacionales (sobre todo a través de cartografiados de galaxias a gran escala) y desarrollo de instrumentación, que busca profundizar en la naturaleza, distribución y dinámica de las galaxias y de los cúmulos de galaxias para comprender su evolución, así como detectar y conocer la materia oscura y averiguar la naturaleza de la energía oscura y las implicaciones de su existencia.

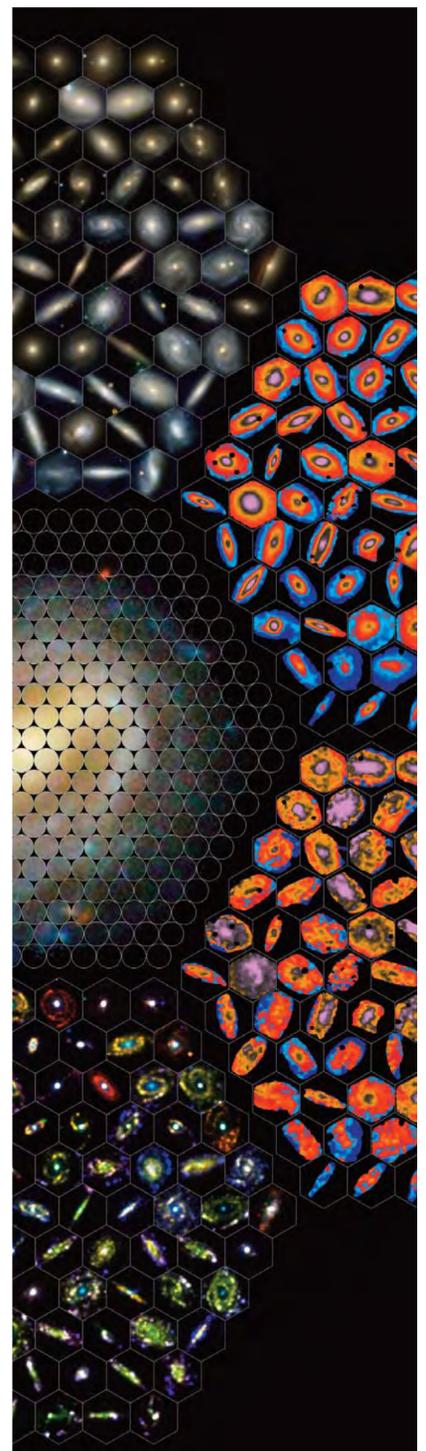
## ...y sus leyes

Al definir el término cosmología hemos hablado de las leyes del universo, un término que puede intimidar pero que nos remite a un fenómeno muy cotidiano: una de esas leyes generales, la gravedad, es la que hace que se nos caigan las cosas y la que nos mantiene pegados a la Tierra, a la Tierra girando en torno al Sol, al Sol girando en torno al centro de la Vía Láctea, etcétera. Se trata de la fuerza de atracción que experimentan entre sí los objetos con masa, y aumenta si estos objetos son muy masivos pero disminuye si están distantes. Seguro que todo esto les suena del colegio, pero lo curioso llega al observar los efectos de la gravedad. 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 espacio tiempo. El espacio tiempo es el escenario en el que se desarrollan todos los eventos físicos del universo, y se trata de un tejido maleable: una analogía muy utilizada compara el espacio tiempo con una sábana tensada, que representaría el universo sin materia. Si ponemos una pelota sobre ella el tejido a su alrededor se curvará, de igual modo que el Sol produce una curvatura espacio temporal. Y, si añadimos una pelota menor cerca de la otra, se verá atraída por ella (esta era la Tierra). Pero, ¿qué ocurriría si depositamos una pelota muy, muy pesada? La curvatura será extrema, ¿no? Pues esto es lo que ocurre en el universo en torno a objetos muy masivos, como los agujeros negros. Los escenarios de gravedad en situaciones extremas, como los agujeros negros o el mismo origen del universo, constituyen una línea de investigación en el IAA que engloba diferentes objetivos, entre ellos tender puentes entre las leyes del universo macroscópico (la gravedad) y el microscópico (la física cuántica), profundizar en el conocimiento de las ondas gravitatorias, una especie de “arrugas” en el espacio tiempo producidas por el movimiento de objetos muy masivos (piensen en las ondas producidas al tirar una piedra a un estanque), o averiguar por qué algunas partículas elementales tienen masa cuando, según la teoría, no deberían tenerla (este es también uno de los objetivos del Gran Colisionador de Hadrones –LHC–, el mayor acelerador de partículas del mundo).

Bueno, y ahora que hemos surcado el universo y llegado hasta sus mismos confines, toca volver, un poco bruscamente, a nuestra silla y a la revista que tenemos entre manos. Desde el Instituto de Astrofísica de Andalucía queremos transmitir nuestra pasión por la ciencia en general y la astrofísica en particular. Una pasión que, esperamos, compartan con nosotros.

En el IAA se han gestado dos grandes cartografiados de galaxias, ambos desarrollados desde el Observatorio de Calar Alto (CAHA).

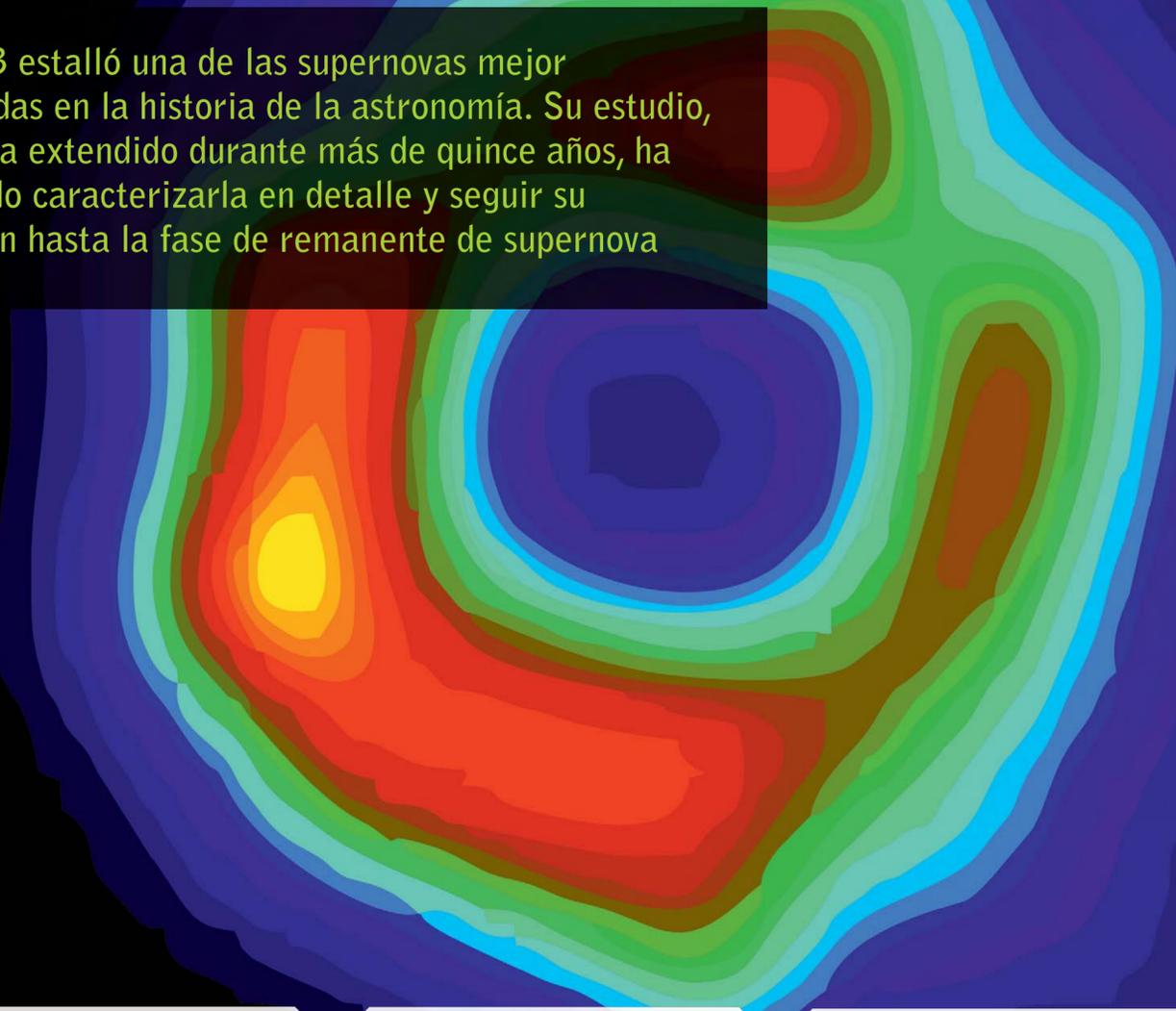
El sondeo ALHAMBRA ha identificado, clasificado y calculado la distancia de más de medio millón de galaxias repartidas en ocho regiones del cielo. Por su parte, el proyecto CALIFA ha empleado espectroscopía 3D para obtener la historia completa de cada una de las seiscientos galaxias de la muestra



Muestra de galaxias del proyecto CALIFA, concebido en el IAA.

# Una supernova de libro

En 1993 estalló una de las supernovas mejor observadas en la historia de la astronomía. Su estudio, que se ha extendido durante más de quince años, ha permitido caracterizarla en detalle y seguir su evolución hasta la fase de remanente de supernova



La supernova SN 1993J estalló en la galaxia M81, situada a una distancia de unos doce millones de años luz, el 28 de marzo de 1993. Alcanzó una magnitud que la convirtió en la supernova más brillante descubierta en el hemisferio norte desde la supernova SN 1954A, y se trata de una de las supernovas mejor observadas en la historia de la astronomía.

Su brillo y distancia la convertían en un objeto de estudio idóneo para observaciones interferométricas de alta resolución angular, una técnica que emplea conjuntos de antenas que funcionan como un radiotelescopio único con un tamaño equivalente a la distancia que separa las antenas. Pero SN 1993J tenía que emitir en longitudes de onda de radio, y así fue. "Gracias a las observaciones de alta resolución angular detectamos por primera vez la estructura tipo *shell* (cáscara o corteza esférica) para una radio supernova joven -señala Antxon Alberdi, investigador del IAA que participó en el hallazgo-. Esta estructura ya había

sido propuesta por los modelos teóricos, que establecían que la emisión en radio se debía al choque entre el material expulsado de la supernova y el medio en torno a la estrella, y que resultaba en la formación de una estructura de tipo cáscara esférica". En esta región los electrones son acelerados a velocidades próximas a la de la luz y, en presencia del campo magnético, emiten un tipo de radiación (radiación sincrotrón) que se detecta a longitudes de onda de radio.

## La película de una supernova

"A lo largo de los años hemos obtenido la primera película de la expansión angular de una supernova y hemos hallado que esta se produce manteniendo un alto grado de circularidad a lo largo de toda su vida", apunta Alberdi (IAA-CSIC). Gracias a las observaciones multiépoca y multifrecuencia se ha comprobado que la expansión se va decelerando con el tiempo y que la deceleración depende de la longi-

tud de onda a la que se observe. Esto ha permitido conocer la densidad tanto del medio en torno a la estrella como del material expulsado por la supernova, así como modelar la variación de la opacidad asociada con los materiales eyectados por la supernova a medida que se expande. Y también se han determinado los parámetros físicos característicos de la emisión en radio: campo magnético y densidad de electrones en región de emisión, eficiencia de la aceleración de los electrones relativistas en el choque frontal y la temperatura de los electrones circunestelares.

En 2009, seis mil días después de su explosión, SN 1993J se había convertido en una supernova muy débil y el medio circunestelar se había vuelto transparente para la supernova en expansión. SN 1993J comenzaba la transición de radiosupernova a remanente de supernova, donde su evolución sería gobernada por la interacción con el medio interestelar.

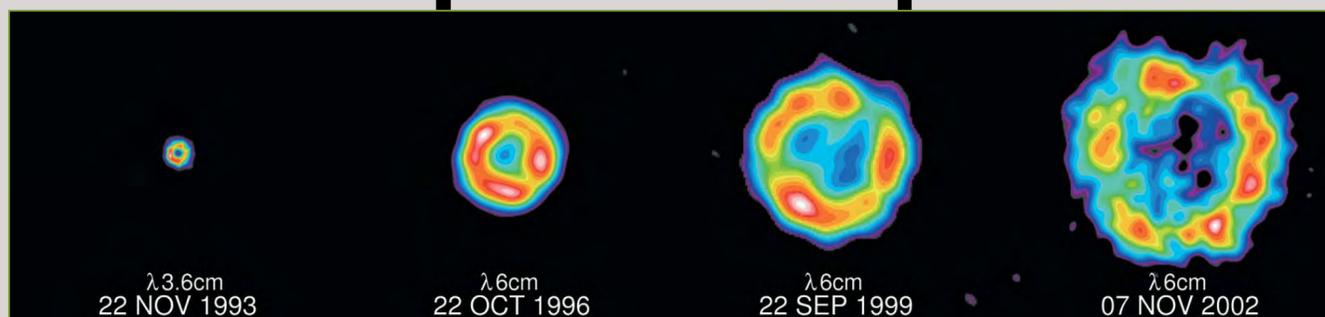


Imagen fondo: SN 1993J. Fuente: J.M. Marcaide et al. y Very Long Baseline Interferometer (VLBI).

## Una factoría de supernovas extremadamente fértil

Las regiones centrales de la galaxia IC 694 albergan una factoría de supernovas realmente prolífica: en 2009 se descubrieron veintiséis fuentes, correspondientes en su mayoría a radiosupernovas jóvenes y a remanentes de supernova, que constituyen diferentes estadios evolutivos del mismo fenómeno, la muerte de estrellas de más de ocho masas solares. Los resultados fueron posibles gracias al uso del *European VLBI Network*.



El par de galaxias en interacción Arp 299, formado por IC 694 y NGC 3690. (NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA))

"Las observaciones de IC 694 nos permitieron estudiar casi en tiempo real cómo las estrellas más jóvenes y masivas mueren e interaccionan con el medio circundante -explica Miguel Ángel Pérez-Torres (IAA-CSIC), principal autor de la investigación-. Si quisiéramos realizar un estudio así en una galaxia similar a la nuestra necesitaríamos cincuenta o cien años. En el caso de IC 694, que presenta estallidos de formación estelar reciente, lo llevamos a cabo en menos de un año. Sin duda, es una verdadera fábrica de supernovas".

La fertilidad de esta galaxia tiene un origen conocido: IC 694 se encuentra en los inicios de un proceso de fusión con otra galaxia menor, NGC 3690, interacción que produce una violenta inyección de gas y que desencadena, sobre todo en IC 694, intensos brotes de formación estelar. Y dichos estallidos producen, lógicamente, una tasa de mortalidad estelar superior a la media.

## Referencias:

- J. M. Marcaide et al. *Discovery of shell-like radio-structure in SN1993J*. Nature. DOI:10.1038/373044a0  
 J. M. Marcaide et al. *Expansion of SN 1993J*. Science. DOI: 10.1126/science.270.5241.1475  
 M. Reggiani et al. *An extremely prolific supernova factory in the buried nucleus of the starburst galaxy IC 694*. Astronomy & Astrophysics. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/200912964>

# Desentrañando el enigma de los GRBs

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

1999

## GRB 990123: implicaciones en el modelo de "bola de fuego"

Los GRBs son intensos destellos de rayos gamma cuya duración oscila entre la centésima de segundo y los cien segundos. Su extrema brevedad es tan solo una de las dificultades para su estudio, ya que nuestra atmósfera bloquea el paso de la radiación gamma e impone la utilización de satélites para la detección de GRBs. Para mayor complicación, la localización que proporcionan los satélites no es lo bastante precisa como para identificar el objeto responsable de la radiación, de modo que se necesita también el apoyo de telescopios en tierra que detecten su emisión en otras longitudes de onda, como la luz visible o el infrarrojo. Además, los GRBs se producen prácticamente

en todas las regiones del cielo, sin ninguna orientación preferente y sin previo aviso, lo que los hace especialmente escurridizos. Su origen fue objeto de un intenso debate hasta la década de los noventa: algunos científicos aseguraban que las explosiones de rayos gamma se producían en el universo lejano, en tanto que otros apostaban por la Vía Láctea como origen de los mismos. La primera identificación en tierra de un GRB en 1997 cerró el debate para asombro de muchos: las explosiones procedían de galaxias muy lejanas, a miles de millones de años luz, lo que implicaba que los GRBs eran los objetos más violentos del Universo: de hecho, la energía liberada por un GRB

equivale a la que emiten mil estrellas como el Sol a lo largo de sus diez mil millones de años de vida. En 1999, cuando aún se desconocían la naturaleza y muchas propiedades físicas de los GRBs, aconteció el intensísimo estallido del 23 de enero. "Intentamos hacer acopio de la mayor cantidad de datos posible para así poder dar una explicación lo más satisfactoria al fenómeno", apunta Alberto Castro-Tirado, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía que encabezó el estudio del GRB. Fue el primer GRB en el que se observó el flash óptico, y se obtuvieron datos en todo el espectro electromagnético y con diversas

técnicas observacionales. Los investigadores concluyeron que el cataclismo cósmico aconteció a unos 9000 millones de años luz, lo que implicaba que fue el objeto cósmico más luminoso del universo observado hasta la fecha (la noche se hubiera convertido en día de haberse hallado en nuestra galaxia). Además, este estudio tuvo importantes implicaciones en el modelo de "bola de fuego" con el que se explicaban estos fenómenos, al mostrar un cambio de pendiente en el declive de la curva de luz en el óptico. Los investigadores interpretaron este declive como la más fuerte evidencia de la colimación del chorro de materia con un ángulo de apertura de unos pocos grados.

2006

## El origen de los GRBs largos

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

galaxias, para analizar la relación entre los GRBs largos y la luz de las galaxias anfitrionas. También comparó los tamaños, morfologías y brillo de las galaxias donde se producen los GRBs largos y las supernovas. "En una primera aproximación es natural pensar que el número de estrellas masivas en una región es proporcional al brillo de dichas regiones -comentaba Javier Gorosabel, astrónomo del IAA e integrante del equipo investigador-. Dado que tanto las supernovas como los GRBs provienen de la explosión de estrellas masivas, cabría también esperar que la probabilidad de que se produzcan esos dos tipos de explosiones fuera proporcional al brillo de las regiones donde se originan. En este novedoso estudio se demuestra que esta expectativa es cierta para las supernovas (como ya se asumía), pero sorprendentemente falsa para el caso de los GRBs".

Así, este estudio mostró que las explosiones largas de rayos gamma tienden a concentrarse en las regiones más brillantes de las galaxias, y que la probabilidad de que un GRB ocurra fuera de ellas es prácticamente nula. Además, concluía que la mayoría de las galaxias anfitrionas de los GRBs son irregulares, débiles y pequeñas, en tanto que las supernovas se producen por igual en galaxias espirales e irregulares, aunque por lo general mayores.

### Discusión

"Si los GRBs largos se generan a partir de supernovas, debía existir una razón que explicara por qué la distribución y la naturaleza de sus galaxias anfitrionas difieren", hacía notar Alberto Castro-Tirado, investigador del IAA que participó en el estudio. Teorías anteriores habían propuesto que solo estrellas muy masivas, de más de 18 masas solares,

serían capaces de experimentar un derrumbamiento del núcleo capaz de generar un agujero negro y, en el proceso, una explosión de rayos gamma. Pero como este tipo de estrellas masivas (clasificadas como tipo O) se encuentran en todas las galaxias, los científicos sugirieron que la diferencia fundamental entre las galaxias donde originan los GRBs largos y las supernovas era la metalicidad, o la evolución química. Un trabajo anterior había propuesto que las estrellas de decenas de masas solares ricas en metales generan unos vientos estelares tan intensos que pierden gran parte de su masa antes de derrumbarse y producir supernovas. De este modo, dejarán tras de sí estrellas de neutrones y no agujeros negros, necesarios para la formación de GRBs largos. Así, las mejores candidatas para generar estos fenómenos eran las estrellas muy masivas con baja metalicidad.

Imagen fondo: concepción artística de una explosión de rayos gamma. Fuente: NASA / SkyWorks Digital.

### Referencias:

# Jets relativistas: viajando casi a la velocidad de la luz

Los jets relativistas pueden considerarse el medio de transporte de materia más veloz del universo

2000

## 3C120: seguimiento de un jet durante año y medio

Los jets relativistas, chorros de partículas que se mueven con velocidades cercanas a la de la luz, requieren de la concurrencia de tres elementos: un agujero negro, un disco de material que gira a su alrededor y campo magnético.

De entre los jets que emiten de manera continua, los más potentes que se conocen son los que se forman en el corazón de algunas galaxias, las que albergan en su núcleo un agujero negro supermasivo (del orden de cien millones de veces la masa del Sol). Los jets que se producen en los núcleos de estas galaxias son capaces de extenderse hasta distancias mucho mayores que el tamaño de la propia galaxia, y emiten enormes cantidades de energía en casi todos los rangos del espectro electromagnético.

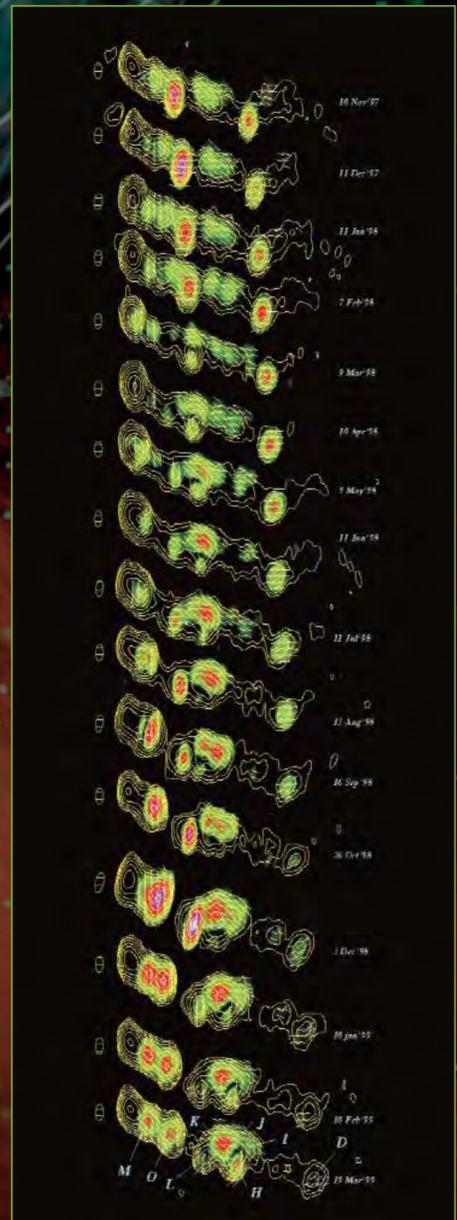
Mediante el uso del VLBA (*Very Long Baseline Array*) se realizó entre 1997 y 1999 el estudio más detallado de un chorro relativista hasta la fecha. Durante cerca de año y medio, un equipo liderado por investigado-

res del IAA tomó imágenes mensuales en radio del chorro relativista en la radiogalaxia 3C120 con una resolución angular de 0,15 milésimas de segundo de arco (con la que podríamos encontrar una pelota de fútbol en la Luna).

Este extenso programa de observación, cuyos resultados se publicaron en la revista *Science*, permitió detectar regiones en el chorro de 3C120 que presentaban cambios rápidos de brillo cuando se encontraban a unos veinticinco años luz del agujero negro, acompañados de variaciones bruscas en la estructura e intensidad del campo magnético. Estas inusuales variaciones se interpretaron como consecuencia de la interacción del chorro en 3C120 con una nube de gas ionizado. “Esta colisión produciría una intensa onda de choque, aumentando la energía tanto de las partículas que forman el chorro como del campo magnético en el que están inmersas, lo que explica el aumento de brillo observado”, apuntaba José

Luis Gómez, investigador del IAA que encabezó el trabajo.

Con anterioridad, gracias a observaciones ópticas, se habían encontrado pruebas de la existencia de nubes de gas similares para explicar las observaciones en 3C120. Estas nubes parecen situarse en dos regiones muy bien diferenciadas: una interna, denominada BLR (*Broad Line Region*), formada por nubes muy densas que presumiblemente giran a gran velocidad de millones de kilómetros por hora y confinadas en una región que se extiende hasta tres o cuatro años luz del agujero negro central; y otra más externa, que comienza a unos treinta años luz del centro de la galaxia, conocida como NLR (*Narrow Line Region*) y está formada por nubes menos densas que se mueven a menor velocidad. La nube de gas ionizado encontrada en 3C120 se situaría en una región intermedia entre la BLR y la NLR, haciendo de eslabón entre ambas regiones.



2010

## Anatomía de precisión de un jet

La astronomía en rayos gamma estudia los objetos más energéticos del universo, y desde sus comienzos ha lidiado con un problema grave: determinar de forma precisa y fidedigna la región de donde procede la radiación que llega a los detectores de rayos gamma, lo que permite a su vez averiguar el mecanismo a través del que se produce. Un grupo internacional liderado por astrónomos del IAA localizó, por primera vez sin la aplicación de modelos y con un grado de confianza superior al 99,7%, la región de la que surgió un destello en rayos gamma en el blázar AO 0235+164 y que permite conocer cómo se produjo.

Cuando se habla de blázares, el adjetivo “extremo” es inevitable. Los blázares combinan los rasgos esenciales de la familia de objetos a la que pertenecen (los núcleos

de galaxias activas), es decir, la presencia de un agujero negro supermasivo de hasta miles de millones de masas solares rodeado de un disco de gas, con la presencia de jets relativistas, o chorros de partículas perpendiculares al disco que viajan a velocidades cercanas a la de la luz y que desde nuestra posición vemos casi de frente, por lo que su intensidad puede multiplicarse entre centenares y miles de veces.

“Este trabajo es en cierto sentido rompedor porque estaba ampliamente aceptado que los rayos gamma se producen en una región del jet muy cercana al agujero negro, a menos de tres años luz, y hemos hallado que en este caso el destello se produjo decenas de veces más lejos. Además, lo localizamos en los chorros relativistas, lo que implica la revisión de los modelos de emisión de altas energías en este tipo de

objeto”, destacaba Iván Agudo, investigador del IAA que encabezó el estudio.

### Cronología del destello

El evento comenzó con un aumento de la emisión en radio y microondas de AO 0235+164, detectada con el VLBA (*Very Large Baseline Array*). Este instrumento mostró cómo, junto al núcleo de emisión del chorro, surgió una segunda región de emisión, que los astrónomos atribuyeron a la inyección repentina de material en el chorro. El aumento en la emisión en radio vino acompañado de estallidos a lo largo de todo el espectro electromagnético, desde ondas milimétricas hasta rayos gamma pasando por el óptico.

El grupo investigador debía comprobar que estos destellos, que aparentemente guardaban relación estaban, en efecto, in-

terconectados. Y lo confirmaron con un grado de confianza superior al 99,7%. A partir de ahí ataron cabos: los datos del VLBA situaban el pico de emisión en radio en una región a unos cuarenta años luz del agujero negro, de modo que buscaron un mecanismo que pudiera producir el destello en rayos gamma en las proximidades. Ese mecanismo maneja la existencia de dos “piezas”, una estática (el chorro) y otra en movimiento (correspondiente a la nueva inyección de material), y de una región del chorro que, debido a la interacción con el medio circundante, reconfina el material del chorro, acelera las partículas y produce un aumento de la energía emitida. Cuando la nueva componente atraviesa esa región (denominada onda de recolimación), comienzan a producirse los destellos observados.

Fondo: concepción artística de un jet en una galaxia activa. Fuente: Wolfgang Steffen (UNAM) y José Luis Gómez (IAA).

# Impactos en la Luna

El estudio de los impactos de meteoroides en nuestro satélite permite ajustar las estimaciones sobre impactos en la Tierra o, incluso, calcular la cantidad de materia del cinturón transneptuniano

Arriba: impactos de las leónidas detectados en 1999.  
Debajo: Impacto del 11 de septiembre de 2013.

En ocasiones, para solucionar un problema sobre un objeto astronómico hay que buscar nuevos puntos de vista o, incluso, observar otro objeto que en principio no tiene mucho que ver con el problema original. Así, el estudio de los impactos de meteoroides en la Luna ha permitido obtener información sobre el cinturón de objetos transneptunianos (la zona más allá de Neptuno que alberga gran cantidad de cuerpos helados, Plutón entre ellos) y sobre la frecuencia de impactos en nuestro planeta.

## Los primeros destellos en la Luna

"Queríamos saber la cantidad de materia que hay en el cinturón transneptuniano -señala José Luis Ortiz, investigador del IAA que dirigió la detección de los primeros destellos ópticos de impactos en la Luna. Pensábamos que podría haber una gran cantidad de ella en forma de pequeños cuerpos helados, con hielos muy volátiles, y de tamaños entre centímetros y metros. Cabía la posibilidad de que la cantidad de estos objetos fuera mayor de lo estimado".

Se trata de cuerpos muy volátiles, que la atmósfera de la Tierra desintegraría sin dejar rastro. Pero la Luna carece de esa protección y hasta los fragmentos más pequeños pueden chocar contra su

superficie, de modo que los investigadores dirigieron sus telescopios a la parte nocturna de la Luna que es visible desde la Tierra buscando los destellos de luz que se producirían con los impactos.

En 1998 se probó la técnica, pero sin éxito, y los investigadores propusieron que la lluvia de meteoros de las Leónidas en 1999 ofrecería una oportunidad excelente para detectar, fuera de toda duda, destellos de colisiones contra la Luna. Finalmente esto se consiguió en noviembre de 1999, y en 2000 se publicaron los resultados en la revista *Nature*.

Un tiempo después se realizó la primera detección de impactos esporádicos (impactos producidos por cuerpos no asociados a lluvias de meteoros, que son lluvias de material de cometas conocidos). "Los impactos esporádicos eran los que íbamos buscando desde el principio, y pudimos determinar la cantidad de impactos de material volátil contra la Tierra en función de la energía. Nuestras conclusiones preliminares apuntan a que cae unas tres veces más materia de lo que se pensaba, y la mayoría es de tipo volátil. Siguiendo el éxito de nuestros trabajos pioneros, la NASA estableció un programa específico para hacer lo mismo que nosotros, empezando en

2005", comenta Ortiz (IAA-CSIC).

## El mayor impacto hasta la fecha

El 11 de septiembre de 2013 una roca con la masa de un coche pequeño chocó contra la Luna y produjo un destello casi tan brillante como la estrella Polar. Se trata de la colisión más potente detectada hasta la fecha y su destello, de unos ocho segundos, el más longevo e intenso observado. El hallazgo fue posible gracias a dos telescopios del Proyecto MIDAS (acrónimo en inglés de Sistema de Detección y Análisis de Impactos en la Luna), del que José Luis Ortiz es coinvestigador principal. Estos impactos los producen, mayoritariamente, fragmentos de cometas y asteroides que giran alrededor del Sol y que se conocen como meteoroides.

Como este tipo de impactos tiene lugar a velocidades de decenas de miles de kilómetros por hora, las rocas se funden y vaporizan instantáneamente en el punto de impacto. "Por eso no llamamos meteoritos a estas colisiones, ya que ese término implica que haya fragmentos", aclara José Luis Ortiz (IAA-CSIC). El choque produce una súbita elevación de la temperatura, que da lugar a un destello que se observa con telescopios en tierra y que presenta una duración media de una fracción de segundo -muy por debajo de los ocho segundos que tardó en extinguirse el brillo

del impacto del 11 de septiembre-

El análisis llevado a cabo calculaba que el nuevo cráter podría medir unos cuarenta metros de diámetro, y que el meteoroides que produjo el impacto presentaba una masa de unos cuatrocientos kilos y un diámetro comprendido entre 0,6 y 1,4 metros. Se trata de cifras aproximadas, ya que su determinación depende sobre todo de un parámetro físico no muy bien conocido, denominado "eficiencia luminosa".

La energía implicada en el impacto fue enorme: equivalente a la detonación de unas quince toneladas de TNT. Es, por tanto, al menos tres veces más potente que el mayor impacto detectado hasta la fecha en la Luna por la NASA y que fue grabado por la agencia espacial estadounidense el 17 de marzo de 2012.

Los resultados que se obtienen del análisis de estos destellos de impactos en la Luna permiten conocer la frecuencia con la que los meteoroides colisionan con la Tierra. Una de las conclusiones de esta investigación apunta a que la frecuencia con la que se producen los impactos contra nuestro planeta de rocas de un tamaño similar a la que impactó en la Luna el 11 de septiembre de 2013 podría ser hasta casi diez veces más alta de lo que hasta ahora pensaba gran parte de la comunidad científica.

Fondo: la Luna (NASA/JPL/USGS).

## Referencias

J. L. Ortiz et al. *Optical detection of meteoroidal impacts on the Moon*. Science. DOI: 10.1038/35016015  
Madieto J.M. et al, *A large lunar impact blast on September 11th 2013*. MNRAS. DOI:10.1093/mnras/stu083

# Nebulosas planetarias recién nacidas

En 1999 se identificaba la primera nebulosa planetaria que presentaba signos de la presencia de vapor de agua. Este hallazgo abrió una línea de investigación en lo que se conoce como "fuentes de agua": estrellas evolucionadas, en una etapa de transición entre las gigantes rojas y las nebulosas planetarias

2000

## La primera nebulosa planetaria con vapor de agua

En 1997 se halló K3-35, un objeto de naturaleza dudosa: podía tratarse de una nebulosa planetaria, una de las últimas fases de las estrellas similares al Sol, o de una estrella aún en proceso de formación. En 1998, un estudio dirigido por investigadores del IAA demostraba de forma concluyente que K3-35 era una nebulosa planetaria, pero esto suponía un problema. Otro grupo de investigadores había detectado en ella un tipo de emisión muy intensa producida por el vapor de agua, lo que se conoce como máser de agua, que era incompatible con esta conclusión: aunque las moléculas de agua son abundantes en las gigantes rojas, una fase previa a la de nebulosa planetaria en la que la estrella se expande y las capas exteriores

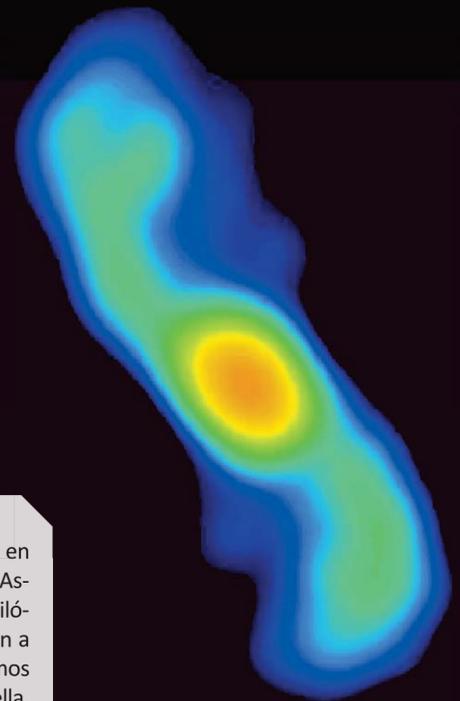
se enfrían, al entrar en la fase de nebulosa planetaria el vapor de agua debería destruirse.

"Como las observaciones existentes no tenían resolución espacial suficiente para localizar con precisión la posición de los máseres, en 1999 observamos K3-35 con el *Very Large Array* (VLA) para obtener datos simultáneos de los máseres de agua y del continuo en radio, que traza la región ionizada", señala Luis F. Miranda, investigador del IAA que encabezó el estudio.

Hallaron que los máseres de agua sí estaban asociados a K3-35, que se convirtió en la primera nebulosa planetaria descubierta con este tipo de emisión (que, además, debía de ser una nebulosa planetaria extremada-

mente joven). Los máseres se hallaban en un disco de 85 UA de radio (una Unidad Astronómica equivale a 150 millones de kilómetros) y, sorprendentemente, también a unas 5000 UA del centro, en los extremos de dos chorros que emergían de la estrella.

"A estas distancias no existen las condiciones físicas para excitar el máser, así que propusimos que los chorros estaban involucrados en la excitación. También observamos los máseres de hidroxilo (OH) en K3-35, y hallamos que a determinadas frecuencias esta emisión estaba circularmente polarizada, lo que implicaba que habíamos detectado por primera vez un campo magnético en una nebulosa planetaria", señala Miranda (IAA-CSIC).



Arriba, la nebulosa k3-35, observada con el Very Large Array. Debajo, imagen que combina datos en radio e infrarrojo de IRAS 15103-5754 y que muestra la velocidad a la que se desplaza el material en el chorro.

2015

## Las estrellas como el Sol también explotan cuando mueren

El nacimiento de las nebulosas planetarias, objetos resultantes de la muerte de estrellas de masa baja e intermedia, suele concebirse como un proceso tranquilo, en contraposición con las intensas explosiones de supernova que producen las estrellas muy masivas. Sin embargo, un estudio encabezado por investigadores del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) puso de manifiesto que los fenómenos explosivos también intervienen en la formación de las nebulosas planetarias.

"Dentro de miles de millones de años, el Sol agotará su combustible nuclear, se expandirá hasta transformarse en una gigante roja y expulsará gran parte de su masa. El resultado final será una enana blanca rodeada de una brillante nebulosa

planetaria. A pesar de que todas las estrellas de menos de diez masas solares sufren este cambio, aún no conocemos muchos detalles de esta breve pero importante etapa final en la vida de las estrellas", apunta José Francisco Gómez, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que encabezaba la investigación.

Y el estudio del objeto IRAS 15103-5754, que forma parte de un grupo de dieciséis objetos conocidos como "fuentes de agua", ha aportado importantes claves sobre el proceso. Estas fuentes de agua son estrellas evolucionadas, en una etapa de transición entre las gigantes rojas y las nebulosas planetarias, que muestran unos chorros de material detectables por un

tipo de radiación muy intensa producida por las moléculas de vapor de agua (emisión máser de agua).

IRAS 15103-5754 resulta peculiar dentro de este reducido grupo, ya que se ha observado que la velocidad del material dentro del chorro aumenta con la distancia a la estrella central. "Las moléculas de agua se destruyen al poco formarse la nebulosa planetaria, y en los pocos casos en que se ha detectado emisión máser de agua en estos objetos la velocidad era muy baja -apunta Luis F. Miranda (IAA-CSIC, Univ. Vigo)-. En IRAS 15103-5754 vemos por primera vez emisión máser de agua a velocidades de cientos de kilómetros por segundo. Estamos ante una estrella capturada justo en el momento en que

acaba de convertirse en nebulosa planetaria".

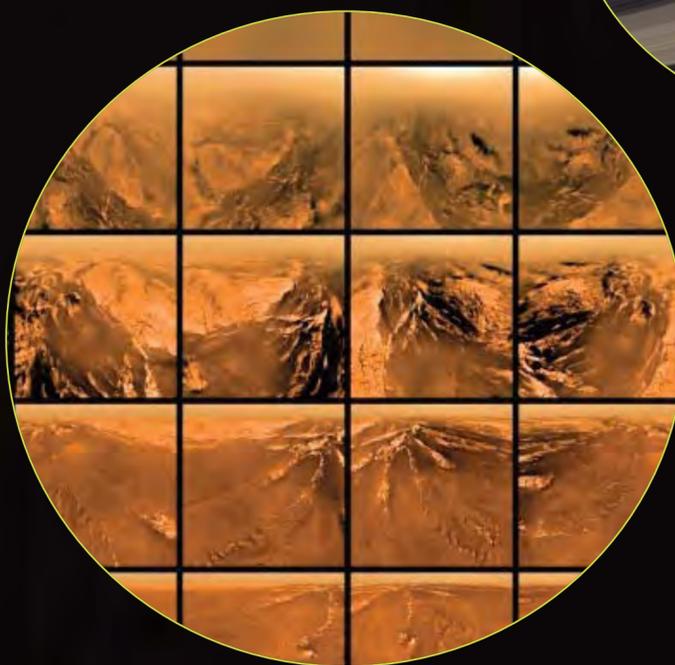
Y esa velocidad solo puede explicarse con la existencia de un evento explosivo. "Nuestros resultados indican que, en contra de la teorías más aceptadas, cuando una estrella se convierte en nebulosa planetaria se produce una enorme explosión, breve pero muy energética, que determinará la evolución de la estrella en sus últimas fases de vida", señala José Francisco Gómez (IAA-CSIC).

Este estudio pone de manifiesto la importancia de estas fuentes de agua para comprender cómo se rompe la simetría de las estrellas en sus etapas finales, y entender así la espectacular variedad de formas que presentan las nebulosas planetarias.



# Atravesando la neblina de Titán

Titán, la mayor luna de Saturno, es el único satélite del Sistema Solar que presenta una atmósfera densa y el único objeto, a excepción de la Tierra, donde se ha confirmado la existencia de material líquido en superficie. La misión Cassini Huygens, en la que participó el IAA, ha supuesto una revolución en el conocimiento de este satélite



Arriba, concepción artística de la misión Cassini Huygens. Derecha, imágenes de Titán tomadas durante el descenso hacia la superficie por el instrumento DISR a bordo de la sonda Huygens. De fondo, el contorno del satélite. Fuente: ESA/NASA/JPL/University of Arizona.

Hace apenas una década podíamos resumir en pocas frases lo que sabíamos de Titán, la mayor luna de Saturno: que presentaba atmósfera (Comás Solá, 1908), que contenía metano (Gerald P. Kuiper, 1944), que su temperatura en superficie, de 179 grados bajo cero, era muy baja como para desarrollar vida (Pioneer 11, 1979), y que todo el satélite se hallaba cubierto por una capa de densa neblina impenetrable con telescopios ópticos (Voyager 1, 1980). Sin embargo, este curioso satélite con atmósfera de planeta y, se creía, lagos de metano sobre su superficie, despertó la curiosidad suficiente como para que la misión Cassini, destinada a sobrevolar Saturno y sus satélites, incluyera un módulo de descenso, Huygens, que aterrizaría sobre Titán. Cassini llegó a Saturno a mediados de 2004 y su sonda Huygens descendió con éxito sobre Titán. El Instituto de Astrofísica de Andalucía participó en el equipo internacional que desarrolló el instrumento HASI (Huygens Atmosphere Structure Instrument), uno de los instrumentos que, a bordo de Huygens, llevó a cabo el estudio de la composición, estructura y propiedades eléctricas de la atmósfera de

Titán. Los micrófonos de HASI fueron protagonistas el día del aterrizaje al ofrecernos los sonidos del satélite, y el instrumento midió los distintos parámetros que definen la atmósfera, tanto desde un punto de vista físicoquímico (presión, temperatura, turbulencia, composición media) como radioeléctrico (conductividad, presencia de campos eléctricos, presencia de actividad tormentosa, ambiente acústico). Gracias a este instrumento se pudo comprobar que la atmósfera de Titán es muy similar a la que tenía la Tierra hace 3.500 millones de años, antes de la aparición de la vida. Los resultados se mantuvieron fieles a las predicciones y Titán se reveló geológicamente muy parecido a nuestro planeta, con evidencias de precipitaciones, erosión, actividad fluvial y volcánica. Sin embargo, los elementos químicos implicados en estos procesos establecen grandes diferencias: el líquido que corre por la superficie del satélite es metano (y no agua), las rocas son de agua helada (y no silicatos) y, en lugar de lava, los volcanes expulsan agua a bajísimas temperaturas. Más de una década después, la misión sigue enviando datos valiosísimos. Ahora

ya sabemos qué esconde Titán bajo esa neblina (lagos, dunas, montañas y ríos), qué compone su atmósfera e incluso cómo podría ser por dentro.

## El origen de la neblina

La proporción de los compuestos de la atmósfera de Titán (98,4% nitrógeno, 1,6% metano, 0,1-0,2% hidrógeno y pequeñas cantidades de otros compuestos) se hallaba bien caracterizada gracias a la misión Cassini, pero precisamente los datos de uno de sus sobrevuelos sorprendió en 2013 al desvelar la existencia de un gas aún no catalogado en la alta atmósfera de Titán.

La emisión de ese compuesto sin identificar, que producía una señal muy intensa en el infrarrojo (a 3,28 micras), se hallaba presente durante las horas diurnas del satélite desde los seiscientos hasta los mil doscientos cincuenta kilómetros de su superficie, con un pico especialmente intenso a los novecientos cincuenta kilómetros. El hallazgo fue posible gracias a los datos del espectrógrafo VIMS, a bordo de Cassini.

El análisis de esa intensa emisión en el infrarrojo ayudó a resolver cuestiones

abiertas desde hacía décadas, relacionadas con la espesa neblina que cubre la superficie de Titán y que calienta la atmósfera y evita que se condense y disipe.

“Hace décadas se propuso que la capa de neblina de la baja atmósfera de Titán se generaba a partir de moléculas orgánicas complejas, y en 2007 se sugería que estas moléculas podían formarse en la atmósfera superior, varios cientos de kilómetros por encima de su lugar de residencia. Nuestro hallazgo de grandes cantidades de hidrocarburos aromáticos policíclicos en la alta atmósfera confirma estas hipótesis”, señalaba Manuel López-Puertas, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía que encabezó el estudio. Los investigadores consiguieron explicar la señal a 3,28 micras detectada y calcular la abundancia de hidrocarburos aromáticos policíclicos presentes en la alta atmósfera de Titán, cantidad que ha resultado sorprendentemente alta, entre veinte y treinta mil PAHs por centímetro cúbico. “Aportamos así una evidencia clave de la composición y procedencia de la neblina de Titán”, concluía López-Puertas.

## Referencias:

- M. López-Puertas et al. Large abundances of polycyclic aromatic hydrocarbons in Titan's upper atmosphere, *The Astrophysical Journal*, vol 769 issue 2.  
B. M. Dinelli et al. An unidentified emission in Titan's upper atmosphere, *Geophysical Research Letters*, DOI: 10.1002/grl.50332  
M. Fulchignoni et al. In situ measurements of the physical characteristics of Titan's environment. *Nature* 438, 785-791 doi:10.1038/nature04314

# El encuentro con un cometa

La misión Rosetta (ESA) es, sin duda, uno de los hitos destacados de la historia de la exploración espacial: despertó tras treinta y un meses de hibernación, se situó en órbita en torno al cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, envió un módulo para estudiar su superficie y acompaña al cometa a lo largo de su trayectoria en torno al Sol

Hace más de una década despegaba la misión Rosetta (ESA), que nos está brindando la imagen más detallada del núcleo de un cometa y ha ofrecido momentos verdaderamente emocionantes, como las maniobras de entrada en órbita en torno al cometa 67P Churyumov-Gerasimenko o cuando su módulo Philae se posó sobre su superficie.

El Instituto de Astrofísica de Andalucía participó en dos de los once instrumentos a bordo de la misión, la cámara OSIRIS y el instrumento para el análisis de polvo GIADA, y está participando muy activamente en la obtención de resultados científicos de la misión. Resaltamos aquí algunos de ellos.

## La visión más precisa y completa

La misión Rosetta ha producido los mejores datos jamás obtenidos sobre un núcleo cometario. Unos datos que han permitido determinar por primera vez de forma directa su densidad, caracterizar en detalle las diferentes regiones de su superficie o estudiar cómo se desencadena la actividad que genera la envoltura (o coma) y las colas de los cometas.

"Los cometas pueden ayudarnos a entender la formación del Sistema Solar o la procedencia del agua terrestre, pero antes debemos contestar a preguntas fundamentales sobre estos cuerpos cuyas respuestas solo podíamos hallar yendo a uno, ya que cuando comienza la actividad y podemos observarlo desde tierra el núcleo deja de ser accesible al ocultarse tras la coma",

apunta Pedro J. Gutiérrez, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que participa en la misión.

Una de esas cuestiones fundamentales es la estructura interna de los núcleos cometarios, que requiere conocer su densidad, una magnitud que hasta ahora solo se conocía por estimaciones indirectas. La misión Rosetta ha logrado determinar de forma directa la densidad de 67P, un cuerpo la mitad de denso que el agua y que, dado su tamaño, debe de estar vacío en un 80%.

## Una forma nunca vista

Las imágenes de OSIRIS han permitido analizar en detalle la forma de 67P, cuya estructura bilobulada, que recuerda a un patito de goma, podría deberse a que el cometa surgió por la fusión de dos objetos o que, por el contrario, la región entre los lóbulos (también conocida como el "cuello" del cometa) era producto de la erosión. Los investigadores confirmaron que el cometa surgió de la fusión de dos objetos independientes durante la formación del Sistema Solar.

"Como los estratos de cada uno de los lóbulos del cometa son morfológicamente muy uniformes, sabemos clarísimamente que se formaron por acreción de material más o menos en la misma región y que, después, se fusionaron de forma lenta", explica José Juan López Moreno, investigador del IAA que participa en la misión.

## Morfología muy variada

La resolución de OSIRIS, que alcanza deta-

lles de pocas decenas de centímetros, ha desvelado una variedad morfológica inesperada a lo largo de la superficie de 67P. Se han clasificado numerosas regiones distintas en el núcleo del cometa, que reciben nombres de la mitología egipcia y se agrupan en cinco categorías básicas: terrenos cubiertos de polvo, material frágil con fosas y estructuras circulares, grandes depresiones, superficies lisas y zonas de material consolidado.

Una complejidad extraordinaria para un cuerpo de apenas cuatro kilómetros de longitud que, en general, se debe a los episodios de actividad acontecidos durante sus anteriores acercamientos al Sol.

## Actividad antes de lo previsto

La actividad cometaria, que se produce cuando los cometas se acercan al Sol, sus hielos subliman y se libera el polvo, es la responsable de que el núcleo de los cometas -un cuerpo similar a una bola de nieve sucia- adquiera la apariencia característica de estos objetos y despliegue la coma y las colas.

Y la misión Rosetta también ha producido sorpresas a este respecto, al mostrar indicios de actividad a más de seiscientos millones de kilómetros del Sol (más de cuatro veces la distancia entre la Tierra y el Sol), una distancia mucho mayor de lo esperado.

## Los "pozos" de 67P

En 1988 se hallaron, en el núcleo del cometa Halley, unas cavidades circulares y

profundas similares a pozos naturales. El origen de estas estructuras, habituales en los cometas, se ha discutido durante décadas. La misión Rosetta ha permitido detectar actividad en los pozos cometarios por primera vez, en forma de chorros y polvo emergiendo de las paredes, y establecer el mecanismo que los produce. El equipo de la cámara OSIRIS halló dieciocho pozos solo en el hemisferio norte del cometa 67P, que miden entre decenas y cientos de metros de diámetro y que pueden alcanzar varios cientos de metros de profundidad. Su análisis ha permitido descartar tanto procesos de sublimación normales como eventos explosivos.

"Hemos comprobado que el material que se libera en los estallidos de actividad es muy inferior al que vemos excavado en los pozos, de modo que teníamos que hallar un mecanismo alternativo para explicarlos", apunta Luisa M. Lara (IAA-CSIC), integrante del equipo OSIRIS que observó por primera vez el derrumbamiento de paredes en varias zonas de la superficie del cometa.

Este nuevo mecanismo, denominado "colapso de sumidero" (*sinkhole collapse*) plantea la existencia de cavidades situadas entre cien y doscientos metros bajo la superficie del cometa, cuyo techo termina por derrumbarse. Así se crea un pozo profundo y circular, en cuyas paredes queda expuesto material no procesado que comienza a sublimar y produce los chorros observados.

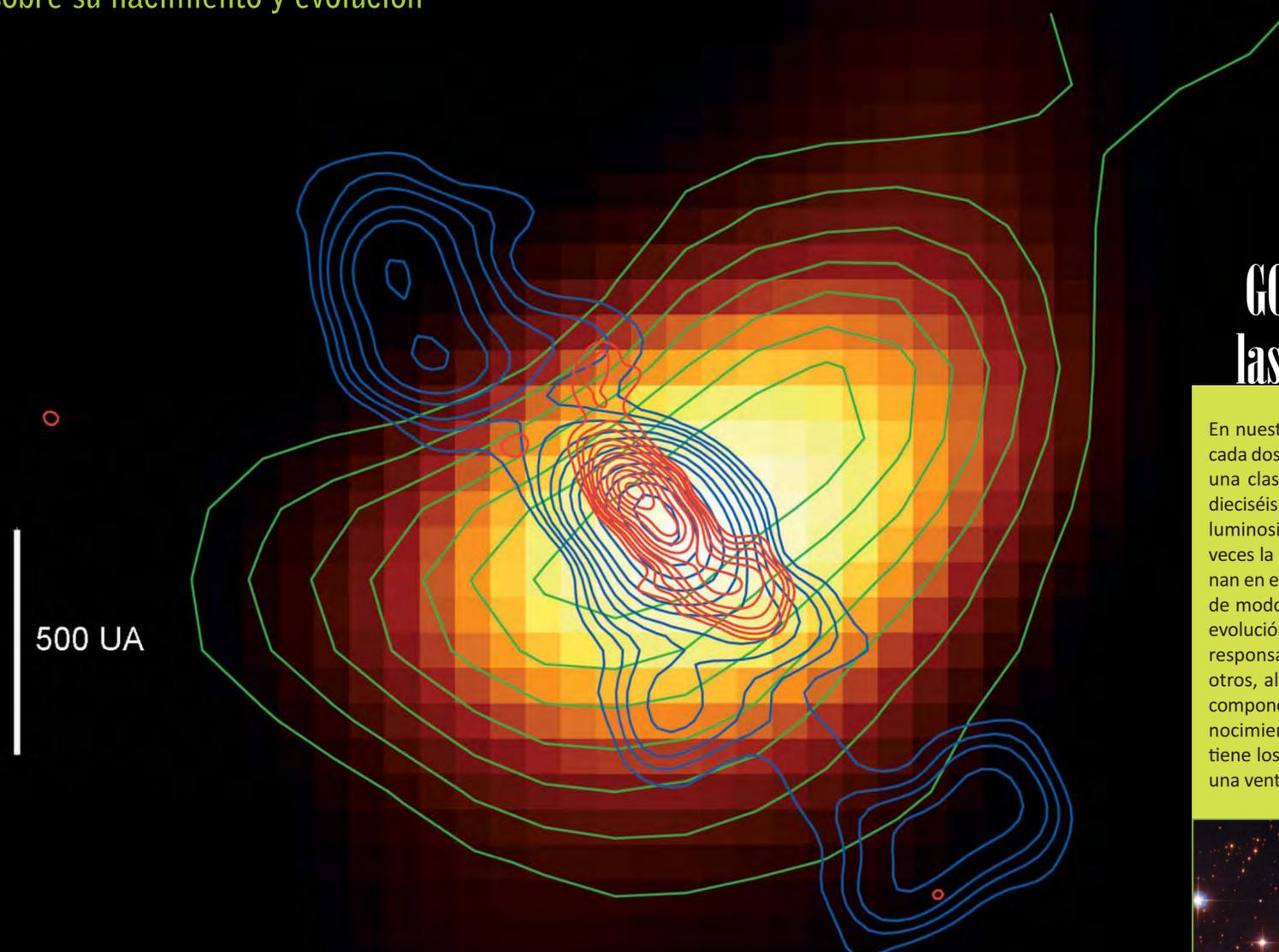
## Referencias:

A. Rotundi et al. *Dust Measurements in the Coma of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko Inbound to the Sun Between 3.7 and 3.4 AU*. Science. DOI: 10.1126/science.aaa3905  
N. Thomas et al. *The Morphological Diversity of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko*. Science. DOI: 10.1126/science.aaa0440

H. Sierks et al. *On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko*. Science. DOI: 10.1126/science.aaa1044  
J-B. Vincent et al. *Large heterogeneities in comet 67P as revealed by active pits from sinkhole collapse*. Nature. DOI: 10.1038/nature14564  
Matteo Massironi et al. *The two independent and primitive envelopes of the bilobate nucleus of comet 67P/C-G*. Nature. DOI: 10.1038/nature15511

# ¿Cómo se forman las grandes estrellas?

Las estrellas masivas tienen, a pesar de su escasez, una enorme influencia en la estructura y evolución química de las galaxias. Sin embargo, esta importancia contrasta con la carencia, a día de hoy, de una teoría completa sobre su nacimiento y evolución



En 2005 se descubrió un disco de gas y polvo en torno a una estrella muy joven con una masa quince veces mayor que nuestro Sol. El descubrimiento, publicado en *Nature*, supuso un fuerte apoyo a la hipótesis de que todas las estrellas, incluso las más grandes, se forman mediante un proceso similar al que, hace ahora 4500 millones de años, dio lugar a la formación de nuestro Sol y su sistema planetario. Sabíamos que las estrellas similares al Sol se forman mediante un proceso de acrecimiento, cuyo primer paso es el colapso de fragmentos de inmensas nubes interestelares de gas y polvo. A lo largo de varios cientos de miles de años, el material se va acumulando en el centro, formando una "protoestrella" o embrión estelar. Del material sobrante, una parte se expulsa en forma de chorros a gran velocidad, mientras que otra se acumula alrededor de la protoestrella, formando un disco de gas y polvo en rotación. Posteriormente,

el embrión estelar se alimenta de materia de ese disco para ir creciendo poco a poco y convertirse en una estrella. En el propio disco puede formarse un sistema planetario similar al sistema solar, al cabo de varios millones de años.

## El problema de la formación de las grandes estrellas

"El nacimiento de estrellas mucho mayores que el Sol seguía siendo un misterio en muchos aspectos, y había defensores tanto del modelo de acrecimiento como del de fusión de estrellas más pequeñas formadas previamente", apunta José Francisco Gómez, investigador del IAA que participó en el estudio. Pero la presencia de un sistema formado por una estrella con un disco de gas y polvo a su alrededor, junto con un chorro de materia expulsado a velocidades de millones de kilómetros por hora en dirección perpendicular al disco, como el en-

contrado, era como la "marca" del proceso de acrecimiento, de modo que el sistema no podía ser fruto de la colisión entre varias estrellas.

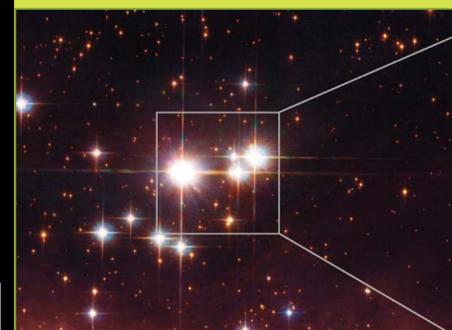
"Un aspecto interesante del descubrimiento es que el tamaño del disco de gas y polvo que hemos observado es solo unas seis veces mayor que nuestro Sistema Solar y esto coincide precisamente con la predicción de los modelos teóricos. Ha habido otros intentos de descubrir estos discos alrededor de estrellas masivas, pero no existían los telescopios adecuados para observar en longitudes de onda submilimétricas con la capacidad de distinguir esas estructuras de gas y polvo a distancias tan grandes de la Tierra", añade Guillem Anglada, investigador del IAA.

La investigación fue desarrollada gracias al *Submillimeter Array*, un conjunto de antenas situadas en la cima del Mauna Kea, en Hawaii.

2010

## GOSS, el catálogo de las grandes estrellas

En nuestro entorno galáctico solo una de cada dos millones de estrellas es de tipo O, una clase cuyos miembros 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 catálogo GOSS, que contiene los datos de 448 objetos, ha abierto una ventana a estos gigantes estelares.



La estrella Pismis 24-1, un sistema múltiple de estrellas masivas. NASA, ESA y Jesús Maíz (IAA).

El espectro de un objeto celeste nos permite conocer sus características esenciales, 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, sobre las que aún no disponemos de una teoría completa sobre su nacimiento y evolución. La muestra de GOSS, que abarcará cuando se complete un total de mil estrellas de tipo O (en torno a un 2% del total de la Vía Láctea), permitirá resolver cuestiones esenciales sobre estas tradicionalmente esquivas estrellas. Un trabajo que ya está aportando resultados destacados, como el hallazgo de la estrella masiva con el campo magnético más intenso hallado hasta ahora (unas veinte mil veces más intenso que el del Sol).

Fondo: imagen del disco de gas (contornos verdes) y polvo (escala de colores), junto con el chorro que emerge en dirección perpendicular (en contornos rojos y azules), obtenida con el *Submillimeter Array*.

# La misión pionera en variabilidad estelar y búsqueda de exoplanetas

El satélite CoRoT, que albergaba un telescopio de treinta centímetros para el estudio de las oscilaciones estelares y la detección de tránsitos planetarios, fue la primera de las misiones "cazoplanetas"

2014

## Mundos antiguos en torno a una estrella "foránea"

En 2014 se hallaron dos planetas en torno a la estrella de Kapteyn, una estrella cercana al Sol con una historia peculiar, ya que posiblemente formaba parte de una galaxia satélite que fue absorbida por la Vía Láctea. Con una edad estimada de unos once mil quinientos millones de años, el sistema planetario de Kapteyn constituye uno de los más antiguos conocidos.

"La mayoría de los planetas detectados en torno a otras estrellas, muchos de ellos gigantes gaseosos, se halla a cientos de años luz de la Tierra -destaca Pedro J. Amado, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía que participa en el hallazgo-. El desafío, a día de hoy, reside en encontrar planetas de tipo rocoso que se hallen en la zona de habitabilidad, la región alrededor de una estrella donde un planeta puede albergar agua líquida".

Y la estrella de Kapteyn que, con una distancia de solo trece años luz, constituye la vigésimoquinta estrella más cercana a la Tierra, reúne ambos requisitos. Su sistema planetario se compone de Kapteyn b, un planeta unas cinco veces más masivo que el nuestro que gira en torno a la estrella cada cuarenta y ocho días, y de Kapteyn c que, con unas siete masas terrestres, muestra un periodo de ciento veintidós días.

El primero, Kapteyn b, constituye el ejemplar más prometedor, ya que se halla en la franja de habitabilidad. Pero para confirmar que, en efecto, se trata de un mundo con agua, se requiere instrumentación aún en desarrollo. El hallazgo ha sido posible gracias al espectrógrafo HARPS, situado en el Observatorio de La Silla (ESO) en Chile. "A día de hoy resulta muy complejo descartar falsos positivos en la búsqueda de exoplanetas, de ahí que los datos de HARPS hayan debido complementarse con otros dos espectrógrafos -destaca Pedro J. Amado (IAA)-. Podremos paliar este problema gracias a CARMENES, un instrumento que estamos desarrollando para el Observatorio de Calar Alto y que, al observar tanto en el visible como en el infrarrojo, permitirá descartar falsos positivos de manera inmediata".

El satélite COROT (CNES/ESA), lanzado el 27 de diciembre de 2006, acercó a la comunidad científica un viejo sueño de los astrónomos: conocer qué ocurre en el interior de las estrellas. Las primeras cuatro letras del nombre de la misión (CONvección y ROTación) respondían al objetivo principal, el estudio de los "terremotos" estelares: el movimiento del gas dentro de las estrellas produce ondas sísmicas que alteran su superficie y producen oscilaciones; y el estudio de estas oscilaciones, conocido como astrosismología, ofrece información sobre la edad de las estrellas, su composición química, rotación y evolución y permite conocer cómo es su interior. La misión CoRoT constituyó un desafío científico y tecnológico que buscaba, como explicaba Rafael Garrido, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía y coordinador de la participación española en la misión, "ampliar a otras estrellas esa capacidad desarrollada, y no del todo, para la estrella más cercana: el Sol". El estudio de los temblores estelares ha permitido indagar en el interior del Sol, la única estrella que permite mediciones directas, pero la distancia impide observar esos "terremotos" en otras estrellas. La alternativa consiste en medir las variaciones en luminosidad que se producen cuando la estrella oscila, método que aplicó CoRoT con una precisión inigualable, al poder detectar variaciones de una parte por millón. Esto le permitió estudiar estrellas similares

al Sol, un tipo especialmente complejo debido a su tamaño (de hecho, el Sol entra en la clasificación de las "enanas amarillas").

### Pionero en precisión y duración de las observaciones

CoRoT, que estaba diseñado con un tiempo de vida de tres años, trabajó durante un total de seis y observó unas 160 estrellas brillantes y más de 160.000 estrellas débiles. Cada serie de observaciones proporcionó unas 12.000 curvas de luz, correspondientes a la observación casi continua durante periodos de hasta 150 días. Esta capacidad, exclusiva de CoRoT, se complementaba con una precisión inigualable, equivalente a observar el millón de bombillas que brillan en los Campos Elíseos y distinguir el parpadeo de una sola de ellas. "Gracias a los datos de que disponemos vamos a necesitar una nueva definición de estrella variable. Hasta ahora existía una clasificación de estrellas que distinguía las que mostraban variaciones de brillo y las que no. CoRoT prácticamente demuestra que no existen estrellas cuya luz no varíe con el tiempo", señalaba Rafael Garrido apenas un año después del lanzamiento de la misión.

Los resultados de CoRoT abarcaron varios tipos de estrellas: realizó la primera detección de oscilaciones de tipo solar en otras estrellas, entre ellas estrellas masivas; aportó la primera señal clara de gra-

nulación en estrellas distintas al Sol (la granulación es un fenómeno debido a la existencia de gas caliente subiendo hacia la superficie, similar al burbujeo del agua al hervir); descubrió cientos de frecuencias en estrellas de tipo delta-Scuti o cefeidas enanas (las cefeidas son un tipo de estrellas variables que se han empleado para medir distancias en el universo); siguió la evolución de una estrella de tipo Be -un tipo de estrella masiva- durante un estallido, y halló oscilaciones inesperadas en las estrellas gigantes rojas que servían de indicadores de su masa, radio o edad, entre otros -la revista *Astronomy & Astrophysics* publicó en 2009 un especial de 55 artículos recogiendo algunos de los resultados de la misión-.

### Búsqueda de exoplanetas

La «T» de COROT hace referencia al método de los Tránsitos, utilizado en la detección de planetas extrasolares. Los tránsitos son "mini eclipses" producidos cuando un planeta que gira en torno a una estrella atraviesa nuestro campo de visión. Resulta imposible ver esa trayectoria en planetas extrasolares, pero sí se puede medir la pequeña disminución en el brillo de la estrella que los tránsitos ocasionan.

Gracias a este método, CoRoT halló un total de treinta y dos planetas, entre ellos el primer planeta de tipo rocoso detectado.

### Referencias:

E. Michel et al. *CoRoT Measures Solar-Like Oscillations and Granulation in Stars Hotter Than the Sun*. Science. DOI: 10.1126/science.1163004  
A&A special issue. *The CoRoT space mission: early results*. Astronomy & Astrophysics volume 506 N°1, October IV 2009.  
G. Anglada-Escudé et al. *Ancient worlds around Kapteyn's star*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. DOI: 10.1093/mnras/slu076

# La atmósfera de Venus, al detalle

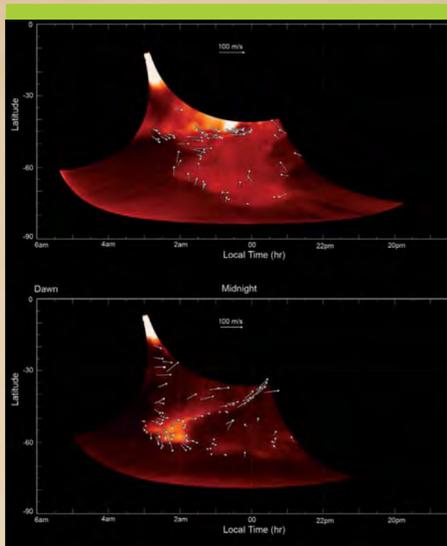
Hasta los años 60 del siglo pasado, Venus se consideró como un gemelo de la Tierra debido a su parecido en tamaño, densidad y masa. Sin embargo, este planeta permanentemente cubierto de nubes se ha revelado como un verdadero rompecabezas, que las misiones espaciales y la mejora de los modelos numéricos están contribuyendo a resolver

2007

## Venus Express

Venus Express (ESA), desarrollada en un tiempo récord de apenas tres años, se lanzó en noviembre de 2005, tomando el relevo de las misiones soviéticas (*Venera* y *Vega*) y estadounidenses (*Mariner*, *Pioneer Venus* y *Magallanes*), pero con considerables avances en los instrumentos científicos a bordo, así como con nuevas geometrías de observación. Todo ello permitió obtener mapas inéditos de la cubierta de nubes permanente y de la superficie con una calidad y una resolución sin precedentes. Los resultados ofrecieron importantes datos sobre su compleja atmósfera, dominada por un descontrolado efecto invernadero y por vientos que giran sesenta veces más rápido que el planeta.

La revista *Nature* publicó en 2007 una sección de nueve artículos, dos de ellos con participación del IAA, que colaboró en el desarrollo de VIRTIS, uno de los instrumentos a bordo destinado a indagar en la



Movimiento aparente de la emisión de oxígeno, que se extiende desde la zona ecuatorial hacia el hemisferio sur. El tiempo transcurrido entre ambas imágenes no excede una hora, lo que muestra la gran variabilidad de la atmósfera de Venus, única en todo el Sistema Solar.

alta atmósfera de Venus, una región explorada pero clave para comprender el escape de gases al espacio y, por tanto, su evolución y las diferencias con la atmósfera terrestre.

Las emisiones observadas en Venus por VIRTIS mostraron ciertas diferencias con los modelos teóricos, lo que indicaba que la atmósfera presenta gran variabilidad a esas alturas. Los científicos creen que el estudio de estos aspectos cambiantes de las emisiones, cuya interpretación resulta muy complicada, será de gran importancia.

Por ejemplo, VIRTIS contribuyó a desvelar un enigma sobre las emisiones de oxígeno de la cara nocturna de Venus: a diferencia de las de la Tierra, parecían demasiado fuertes para tener un origen químico. Lo observado confirmaba un proceso químico que involucra átomos de oxígeno, pero más complejo; el modo peculiar de observación de VIRTIS permitió derivar los

flujos de átomos de oxígeno necesarios para producirla, y concluir que se originan en el hemisferio de día y son transportados al de noche mediante un proceso dinámico a escala planetaria.

Por otra parte, las emisiones de dióxido de carbono, observadas en la alta atmósfera de Venus con gran detalle por primera vez, confirmaban las predicciones de los modelos teóricos elaborados previamente en el IAA y que VIRTIS utilizó como herramienta sistemática de sondeo.

“Todo esto es muy interesante, porque pensamos que gracias a estas emisiones y este modo de observación de *Venus Express* disponemos de un fenómeno sensible a varios procesos químicos, radiativos y dinámicos muy complejos de observar de otro modo, y cuyo seguimiento sistemático podría darnos luz sobre la activa naturaleza de la atmósfera de Venus”, concluía el investigador del IAA Miguel Ángel López-Valverde.

2014

## Superrotación y ondas atmosféricas

El planeta Venus gira muy lentamente sobre sí mismo, tanto que un día allí dura doscientos cuarenta y tres días terrestres. Pero su atmósfera, que debería rotar también despacio, circunda el planeta en apenas cuatro días.

“Venus es un quebradero de cabeza para los especialistas en dinámica atmosférica. Sus vientos superan los cuatrocientos kilómetros por hora, sesenta veces más que la velocidad de rotación del planeta - como comparación, los vientos más veloces en la Tierra están muy por debajo de su velocidad de rotación-”, apuntaba Javier Peralta, investigador del IAA que en

cabezó el estudio. “Pero tras treinta años de investigación, hoy en día seguimos sin un modelo físico que reproduzca fielmente la superrotación de Venus”.

Las ondas atmosféricas, que muestran una extraordinaria variedad y actividad, constituyen una pieza clave para describir la circulación de la atmósfera de Venus, pero su naturaleza y propiedades eran desconocidas. La razón de este desconocimiento se debe sobre todo a que el funcionamiento de la atmósfera de Venus difiere drásticamente de la de planetas que rotan más rápido, como Marte o la Tierra: mientras que en la primera el

La sonda *Venus Express*, sobre una imagen real de las ondas atmosféricas de Venus.



viento tiene un papel predominante en el equilibrio de la presión atmosférica, en las segundas es la rotación el factor dominante.

“Por primera vez, hemos deducido todas las ondas atmosféricas que son solución de las ecuaciones de movimiento propias de Venus”, señalaba Javier Peralta (IAA-CSIC). El trabajo, que ha catalogado un total de seis tipos diferentes de ondas y ha predicho sus características, ofrece una herramienta sistemática de clasificación de ondas, y permitirá estimar su papel en el transporte, creación y disipación de energía en la atmósfera.

### Referencias:

- J. Peralta et al. "Analytical Solution for Waves in Planets with Atmospheric Superrotation". *The Astrophysical Journal Supplement Series*. Part 1: "Acoustic and Inertia-gravity Waves". doi:10.1088/0067-0049/213/1/17. Part 2: "Lamb, Surface and Centrifugal Waves". doi:10.1088/0067-0049/213/1/18
- G. Piccioni et al. South-polar features on Venus similar to those near the north pole. *Nature* 450, 637-640 doi:10.1038/nature06209
- P. Drossart et al. A dynamic upper atmosphere of Venus as revealed by VIRTIS on Venus Express. *Nature* 450, 641-645 doi:10.1038/nature06140

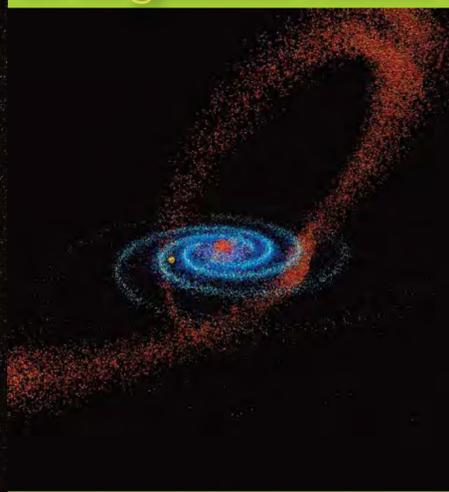
# Cómo se construye una gran galaxia

Aunque sabemos mucho de ella, aún estamos intentando comprender cómo se formó nuestra Galaxia, la Vía Láctea. Aquí dos pistas: lo hizo, en parte, alimentándose de galaxias menores, como Sagitario; y también "de dentro afuera", es decir, formando las regiones centrales primero

2007

## Evidencias del cruce de la galaxia enana de Sagitario con la Vía Láctea

La galaxia enana de Sagitario fue descubierta por casualidad en 1994. En 2001, un estudio sobre su interacción con la Vía Láctea mostró que Sagitario se encuentra en un avanzado proceso de desintegración, que se manifiesta en el desarrollo de una extensa corriente de marea -ríos de estrellas que se mueven a lo largo de su órbita-, que envuelve nuestra Galaxia en una órbita polar. Los modelos teóricos de la corriente de marea de Sagitario predecían que su cola Norte dibujaba un bucle cerrado y se precipitaba casi verticalmente sobre el disco de la Vía Láctea. Un estudio, considerado por investigadores del IAA, aportó las pruebas definitivas a los modelos teóricos al encontrar evidencias observacionales de que la corriente cruza el plano Galáctico en una posición muy cercana a la vecindad solar.



La Vía Láctea, en azul, y la galaxia enana de Sagitario, que dibuja un bucle cerrado en torno a nuestra Galaxia. La situación del Sol corresponde al pequeño punto amarillo. Fuente: David Law/University of Virginia.

### La falsa galaxia enana

El estudio de Sagitario permitió, además, demostrar que el supuesto satélite de la Vía Láctea hallado en enero de 2006 en la constelación de Virgo es en realidad parte de Sagitario. La comparación de la posición y estructura de Virgo con modelos teóricos de la corriente de marea de Sagitario muestran que la sobredensidad de estrellas observadas en Virgo es la proyección en el cielo de la corriente de Sagitario en su caída sobre el disco galáctico y aproximándose a la región donde se halla el Sol. Esto proporciona una explicación natural a su gigantesca extensión (que ocupa un área en el cielo equivalente a un cuadrado de sesenta lunas de lado), debida a que estamos atravesando una corriente colimada de estrellas. Se puede hallar una analogía en las Leónidas, una lluvia de estrellas fugaces que

ocurre cuando la Tierra atraviesa la corriente de partículas procedentes del cometa Tempel-Tuttle. Durante las Leónidas de 1887 se divisó una gigantesca mancha difusa en el firmamento en una posición cercana al radiante (la zona del cielo donde parece originarse la lluvia), producida por la dispersión de la luz provocada por las partículas cometarias. Este fenómeno, conocido como *radiant glow* (luminiscencia de radiante), resulta similar al de la supuesta galaxia enana, pero las "partículas" son las estrellas de Sagitario, cuya densidad se distribuye en una enorme mancha en el cielo en una posición cercana a Virgo. Así, el estudio del grupo español concluye que Virgo no es una galaxia satélite girando en torno a la Vía Láctea como se anunció en 2006, sino los restos de marea de Sagitario "lloviendo" sobre la vecindad solar.

2014

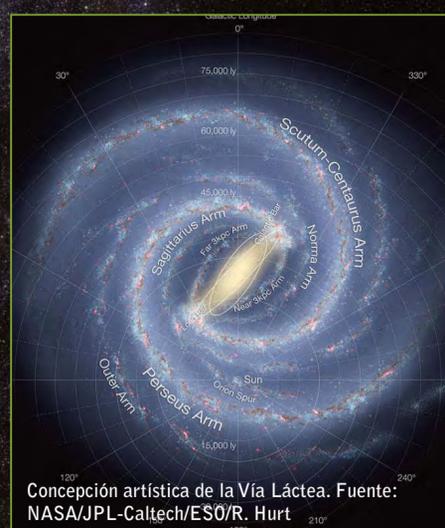
## Crecimiento "de dentro afuera"

El proyecto Gaia-ESO, la extensión desde tierra de la misión Gaia (ESA), se diseñó para obtener datos espectroscópicos de alta calidad de unas cien mil estrellas de la Vía Láctea y permitir un análisis exhaustivo de la formación, evolución y características de las distintas poblaciones de estrellas que constituyen la Galaxia.

El modelo cosmológico actual defiende una formación del universo de pequeño a grande, donde las galaxias mayores surgieron a partir de la agrupación de objetos más pequeños. Sin embargo, simular de forma

realista la formación y evolución de la Vía Láctea -un proceso que implica innumerables factores-, aún queda lejos de nuestra capacidad.

"Por ello recurrimos a las estrellas: de igual modo que la historia de la vida se dedujo examinando las rocas, esperamos deducir la historia de nuestra Galaxia estudiando las estrellas, porque las estrellas develan su pasado a través de su edad, composición o movimiento", señala Emilio J. Alfaro, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que participa en Gaia-ESO.



Concepción artística de la Vía Láctea. Fuente: NASA/JPL-Caltech/ESO/R. Hurt

La primera liberación de datos de Gaia-ESO ha permitido, precisamente, indagar en la evolución de la Vía Láctea. Analizando las proporciones de magnesio en las diferentes poblaciones de estrellas del disco galáctico, los investigadores del proyecto distinguieron dos ritmos de crecimiento distintos: mientras que las regiones internas la formación de estrellas fue eficaz y rápida, en las regiones externas tomó más tiempo. Así, nos hallaríamos ante una evolución de "dentro afuera", donde las regiones centrales de la Galaxia se formaron antes.

Fondo: la Vía Láctea vista desde tierra. Fuente: ESO/S. Brunier

### Referencias:

D. Martínez-Delgado et al. *The Virgo Stellar Overdensity: Mapping the Infall of the Sagittarius Tidal Stream onto the Milky Way Disk* The Astrophysical Journal, 660:1264-1272, 2007 May 10  
S. Milolaitis et al. *The Gaia-ESO Survey: the chemical structure of the Galactic discs from the first internal data release.* Astronomy & Astrophysics DOI: 10.1051/0004-6361/201424093

# El IAA en e



Comás Solá  
HASI  
1995

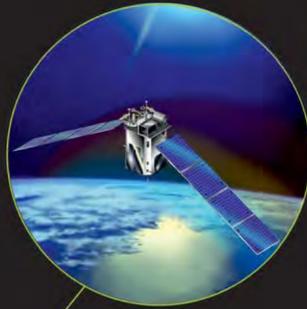
1995

Cassini-Huygens

1997

PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA Y  
TECNOLÓGICA

Misión con destino a  
Saturno y su mayor  
luna, Titán  
(NASA/ESA)



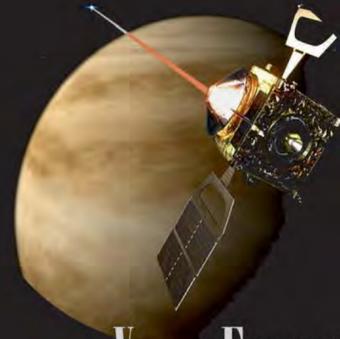
SABER

2001

PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA

Instrumento a bordo  
del satélite TIMED  
(NASA)

2000



Venus Express

2005

PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA Y  
TECNOLÓGICA

Misión con destino a  
Venus (ESA)



HINODE

2006

PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA

Satélite para el estudio  
del Sol (NASA)

2005

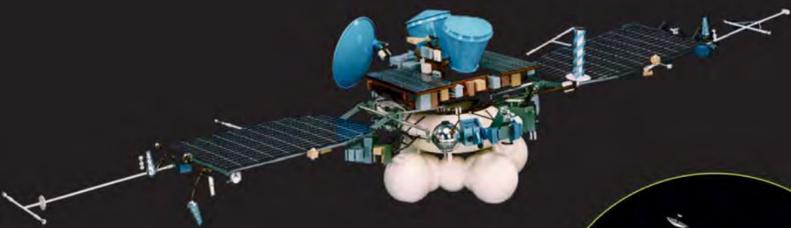
2010

1996

Mars96

PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA Y  
TECNOLÓGICA

Misión con destino a  
Marte (NPO  
Lavochkin)



Instrumento a bordo  
del satélite ENVISAT  
(ESA)

PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA Y  
TECNOLÓGICA

2003

MIPAS

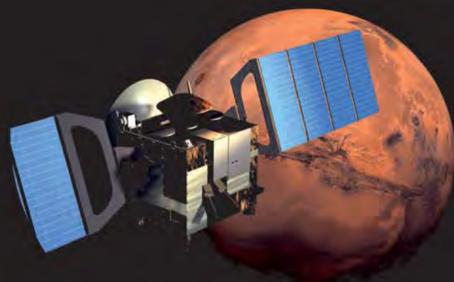


Misión con destino a  
Marte  
(ESA)

PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA Y  
TECNOLÓGICA

2003

Mars Express



Misión con destino al  
cometa Churyumov-  
Gerasimenko (ESA)

PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA Y  
TECNOLÓGICA

2004

Rosetta

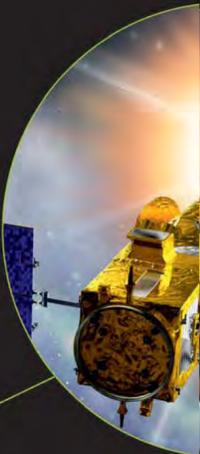


Misión para el estudio  
de la variabilidad  
estelar y la búsqueda  
de planetas  
extrasolares (ESA)

PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA Y  
TECNOLÓGICA

2006

CoRoT



1981



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

PARTI

# el espacio

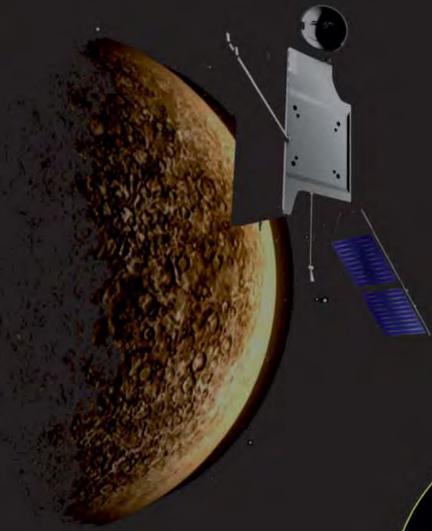


**Sunrise**

**2009/13**

**PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**

Misión para el estudio del magnetismo solar



**Bepicolombo**

**2016**

**PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**

Misión con destino a Mercurio (ESA)



**ASIM**

**2016-17**

**PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA**

Instrumento para el estudio de la atmósfera terrestre desde la Estación Espacial Internacional



**JUICE**

**2022**

**PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**

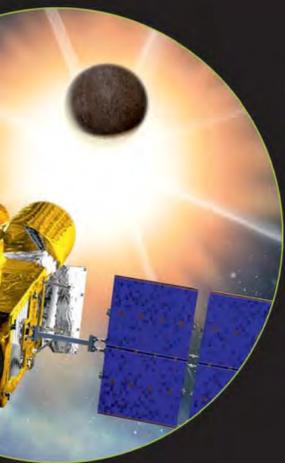
Misión con destino a Júpiter y los satélites galileanos (ESA)

**0**

**2015**

**2020**

**2025**



Misión con destino a Marte (ESA)

**PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**

**2016**

**Exomars**

Misión para el estudio del Sol (ESA)

**PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**

**2018**

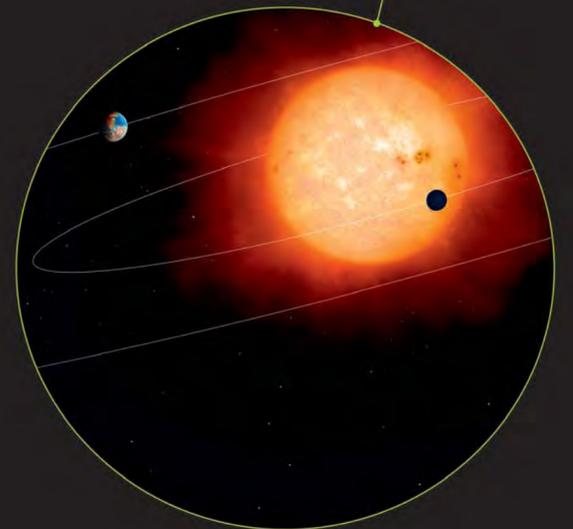
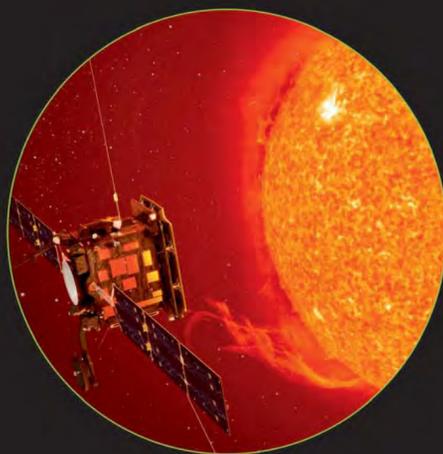
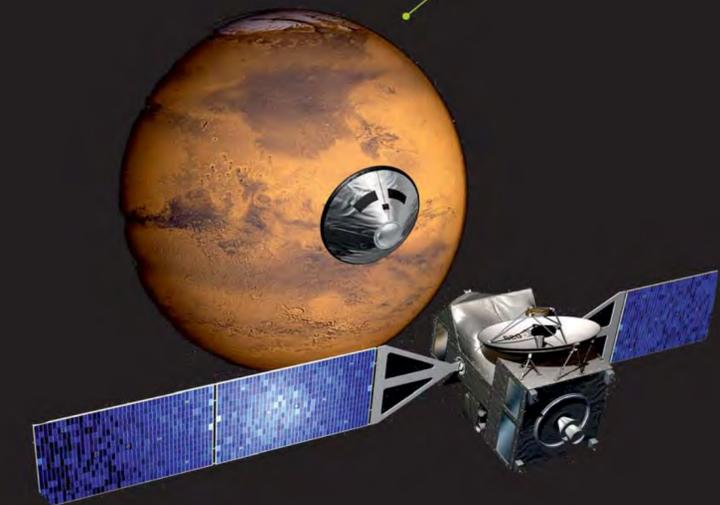
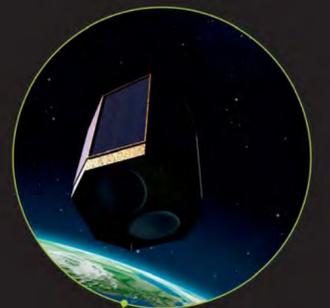
**Solar Orbiter**

Misión para el estudio de planetas extrasolares de tipo terrestre (ESA)

**PARTICIPACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**

**2024**

**PLATO**



**PARTICIPACIÓN DEL INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA EN MISIONES ESPACIALES**

# Aproximándonos al agujero negro central de la Vía Láctea

Las regiones centrales de nuestra Galaxia albergan un agujero negro supermasivo que, aunque se halla en estado de letargo, sufre en ocasiones episodios de actividad

Sgr A\*

Aunque el objeto que hoy conocemos como Sagitario A\* se descubrió en 1974, pasaron décadas hasta que ese objeto puntual que detectaron los radiotelescopios en las regiones centrales de la Vía Láctea fuera confirmado como un agujero negro supermasivo. A finales del siglo pasado se obtuvo una primera evidencia, gracias al meticuloso estudio del movimiento de las estrellas cercanas: no solo detectaron velocidades extremas (1.500 kilómetros por segundo) en órbitas muy pequeñas en torno a SgrA\*, sino que hallaron que la velocidad de las estrellas aumentaba hacia las cercanías del objeto (algo similar a lo que ocurre con los planetas del Sistema Solar), lo que constituye un claro indicio de que se encuentran bajo la influencia de un campo gravitatorio muy intenso que debe ser causado, además, por un objeto muy compacto. En 2002 se determinó, además, con una precisión inédita la órbita de la estrella S2, que dibuja una elipse muy pronunciada en torno a SgrA\* y que, en el punto de máximo acercamiento, se sitúa a unas tres veces la distancia que existe entre el Sol y Plutón. Gracias a los datos sobre las órbitas estelares (y a otros obtenidos con redes de radiotelescopios) se pudo calcular la masa de Sagitario A\*, que equivale a unos cuatro millones de soles, y se confirmó que se halla conte-

nida en un volumen muy reducido. Ya no cabía duda: habían encontrado el agujero negro central de la Vía Láctea.

"Sagitario A\* es el único núcleo galáctico y el ambiente astronómico más extremo que podemos examinar en escala de milipársecs. Un milipársec equivale más o menos al doble del radio de influencia del Sol, una distancia verdaderamente pequeña a nivel astronómico", señala Rainer Schoedel, investigador que encabezó el estudio de la órbita de la estrella S2 y que dirige actualmente en el IAA un proyecto de investigación sobre el centro galáctico.

#### Un triturador de materia

En 2008, un grupo internacional de astrónomos detectó intensas fulguraciones producto del desgarramiento de las nubes de gas que giran, a una velocidad de vértigo, en las últimas órbitas antes de caer al agujero negro. El hallazgo se realizó con los telescopios VLT y APEX, que observan en el infrarrojo y en ondas submilimétricas respectivamente.

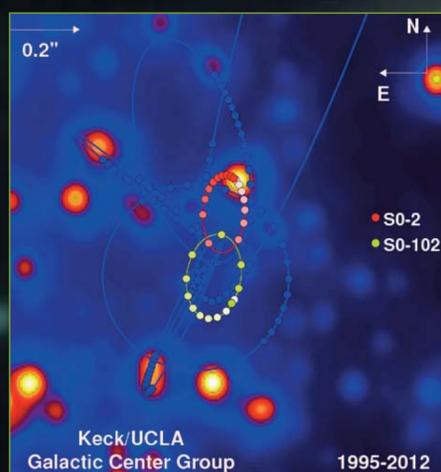
"SgrA\* es visible en la luz infrarroja durante cortos periodos de tiempo, cuando exhibe fuertes fulguraciones –explica Rainer Schoedel-. Como no se puede prever cuándo ocurrirán estas fulguraciones, no es fácil observarlas con dos telescopios que no estén en el mismo lugar, porque una simple nube podría tapar la región

del cielo que nos interesa. Además, hay que tener mucha paciencia". Tras varias noches de espera, los astrónomos encargados del VLT descubrieron que SgrA\* se activaba, y que su brillo aumentaba cada minuto. Alertaron a sus colegas del APEX y, durante las siguientes seis horas, observaron violentas variaciones en el brillo de SgrA\*, además de cuatro fulguraciones mayores.

Como preveían los astrónomos, las fulguraciones se registraron en ondas submilimétricas con una hora y media de retraso con respecto a las infrarrojas, lo que se debe a la expansión de las nubes de gas que finalmente caen al agujero negro: la velocidad con la que giran las nubes en las últimas órbitas en torno a SgrA\* hace que se estiren, aumenten su tamaño y se vuelvan más transparentes. Es entonces cuando la radiación puede viajar a través de ellas y llegar hasta nosotros, aunque por fases: la nube se hace transparente primero para las longitudes de onda cortas, como las infrarrojas, y después para las que tienen una longitud mayor, como las submilimétricas. De ahí la hora y media de retraso.

#### Sagitario A\* y la Relatividad General

En 2012 se halló S0-102, la estrella más próxima a Sagitario A\*, que gira alrededor del agujero negro cada 11,5 días. "Con el



Órbitas de las estrellas más próximas a Sagitario A\*. Imagen creada por la Prof. Andrea Ghez y su grupo de investigación en UCLA a partir de datos obtenidos por los telescopios W. M. Keck.

Fondo: las regiones centrales de la Vía Láctea. Fuente: UCLA Galactic Center Group - W.M. Keck Observatory Laser Team.

# Definitivamente, no se puede viajar más rápido que la luz

El motor de curvatura se basa en el movimiento del propio espaciotiempo que, según la relatividad, carece de restricciones en cuanto a su velocidad. Un estudio demostró que resulta inestable

Según la Teoría de la Relatividad General, nada puede viajar a más de trescientos mil kilómetros por segundo, lo que impide una exploración espacial profunda: llegar a la estrella más cercana requeriría, como mínimo, cuatro años de viaje, y ni hablar de cruzar la Galaxia, que exigiría varias decenas de miles de años. Una de las posibilidades teóricas para escapar de esta limitación era el motor de curvatura (*warp drive*), consistente en mover el propio espaciotiempo que, en principio, puede contraerse y expandirse sin límite de velocidad. Un estudio mostró dos efectos del motor de curvatura que imponen serias restricciones a su desarrollo.

El motor de curvatura tiene su origen en la ficción: se trata del mecanismo que permite a los personajes de *Star Trek* surcar el espacio más rápido que la luz, o a velocidades superluminares, mediante la distorsión del espaciotiempo. Su salto al terreno científico tuvo lugar en 1994, año en el que el físico Miguel Alcubierre publicó un trabajo que aprovechaba la flexibilidad de la geometría del espaciotiempo, que se curva en presencia de materia del mismo modo que, por ejemplo, una pelota situada sobre una sábana tensada curva el tejido a su alrededor. En el universo, los objetos más masivos producen curvaturas más acentuadas, y Alcubierre diseñó el siguiente medio de transporte: una burbuja cuyas paredes, compuestas de materia "exótica", producen una contracción del espaciotiempo en la proa y una dilatación en la popa similares a una ola en el mar. Una nave dentro de la burbuja alcanzaría su destino "sin moverse" por la distorsión local del espaciotiempo, igual que un surfista situado sobre la cresta no ejerce un movimiento propio pero alcanza la orilla gracias al de la ola.

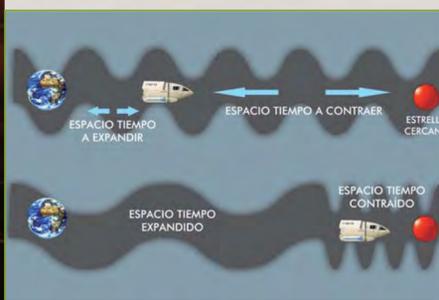
## Fluctuaciones del vacío

"El motor de curvatura es una construcción matemática muy ingeniosa, que incluso hizo pensar si podría hacerse ingeniería de ella. Pero, ¿es realista construirlo?", apunta Carlos Barceló (IAA-CSIC), cuyo trabajo ofreció una respuesta negativa. El motor de Alcubierre ya mostraba debilidades, como la enorme cantidad de energía necesaria en forma de materia exótica, un tipo de materia aún hipotético que supondría convertir en energía toda la masa de Júpiter, o el propio comportamiento de esa materia exótica una vez acoplada a la gravedad: la teoría muestra que resulta más fácil configurar la materia exótica en láminas muy finas, y unas paredes finas producirían cambios demasiado bruscos en el tejido espaciotemporal.

"Pero hay algo que no se ha contemplado y puede afectar al movimiento de esa burbuja: cómo actúan las fluctuaciones cuánticas ante las curvaturas", señala Carlos Barceló. Cuando la burbuja se desplaza a velocidad superluminal, desde el punto de vista del observador interno las paredes anterior y posterior se comportan como un horizonte blanco y un horizonte negro respectivamente. Esto es: si el astronauta de la nave mira hacia atrás no verá absolutamente nada, ya que se está desplazando a mayor velocidad que la luz y ninguna señal puede alcanzarle; en cambio, la proa de la nave recibirá todas las señales, y por ello se habla de horizonte blanco.

En este reciente estudio, los físicos han calculado cómo se comporta el espaciotiempo en ambos horizontes cuando la burbuja se acerca a la barrera de la luz, y han hallado dos efectos que impiden el viaje, ambos relacionados con las fluctuaciones cuánticas.

En la teoría cuántica ocurre que, aunque el estado de mínima energía es el vacío (o estado de no partícula), la energía del vacío nunca es equivalente a cero. Para explicar esta aparente contradicción se habla de la creación y destrucción de pares, que implica que hay un constante nacimiento y aniquilación de parejas de partículas, tan rápido que resulta imposible detectar su presencia. Por ello se las conoce como partículas virtuales. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, como una fuerte distorsión del espaciotiempo, esas partículas pasan a ser reales. Esto es lo que ocurre en ambos horizontes de la burbuja, con catastróficas consecuencias.



## Dos horizontes problemáticos

En el horizonte negro se produce un resplandor debido a la radiación de Hawking, un efecto conocido en los agujeros negros, objetos que presentan campos gravitatorios tan intensos que nada, ni la luz, puede escapar. Aunque siempre se pensó que ninguna emisión podía proceder de ellos, Stephen Hawking predijo en 1974 que los agujeros sí emiten radiación debido, precisamente, a la creación y destrucción de pares en el borde del horizonte de sucesos,

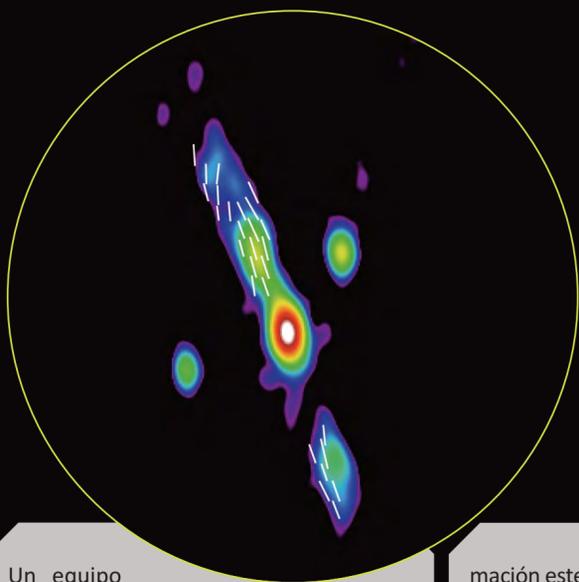
o región límite a partir de la que sí es posible la huida: el enorme campo gravitatorio del agujero negro puede romper el par y absorber una de las partículas, mientras que la otra escapa y pasa de ser una partícula virtual a una partícula real. El efecto es un resplandor que parece proceder del agujero negro y cuya intensidad, en el caso del horizonte negro de la burbuja, depende del grosor de la pared: una pared fina, más fácil de obtener en teoría, presentaría temperaturas muy altas que podrían destruir la nave que viajara en su interior.

Y, aunque pudieran construirse paredes tan gruesas que la temperatura producida por la radiación de Hawking no fuera un obstáculo, el horizonte delantero, el blanco, supone un impedimento insalvable. La contracción del espaciotiempo en la parte delantera produciría, igualmente, la ruptura de los pares de partículas, aunque con la diferencia de que todas las partículas irían amontonándose en la pared produciendo en ella una acumulación exponencial de energía. "Un crecimiento exponencial es incontrolable –asegura Carlos Barceló–, y hace inconsistente la construcción porque tiende a destruirse. O inventamos una manera de contrapesar esa energía con una energía inversa que dificulta aún más la tarea, o simplemente hay que admitir que no podemos superar la velocidad de la luz por largos periodos de tiempo". Otra opción consiste en no atravesar la barrera de la luz, de modo que no se produjeran horizontes, ni radiación de Hawking, ni altas temperaturas. Como los autores señalan al final del artículo, "quizá viajar al 99% de la velocidad de la luz no esté tan mal, después de todo".

Fondo: imagen de Francisco Puga Ortiz.

# Las estrellas jóvenes “imitan” a los agujeros negros

Se halla, por primera vez en una estrella en formación, un chorro supersónico magnetizado. Las características de su campo magnético son similares a las de los chorros hallados en agujeros negros, lo que apunta a un origen común



Un equipo internacional de astrónomos llevó a cabo en 2010 un estudio que reveló la estrecha conexión existente entre objetos tan diversos como los núcleos activos de galaxias, de cientos de millones de masas solares, las estrellas en formación, los púlsares o las enanas marrones. El estudio se centraba en los chorros de materia a muy alta velocidad que eyectan estos objetos, y supuso una de las primeras evidencias de que se rigen por un mecanismo común, gobernado por el campo magnético. Constituyó, además, un hallazgo pionero, al tratarse del primer chorro magnetizado detectado en una estrella en formación. El trabajo se publicó en la revista *Science*.

“Este resultado abre una nueva vía para estudiar el campo magnético, el parámetro más desconocido en el proceso de for-

mación estelar”, señalaba Carlos Carrasco-González, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que encabezó el estudio.

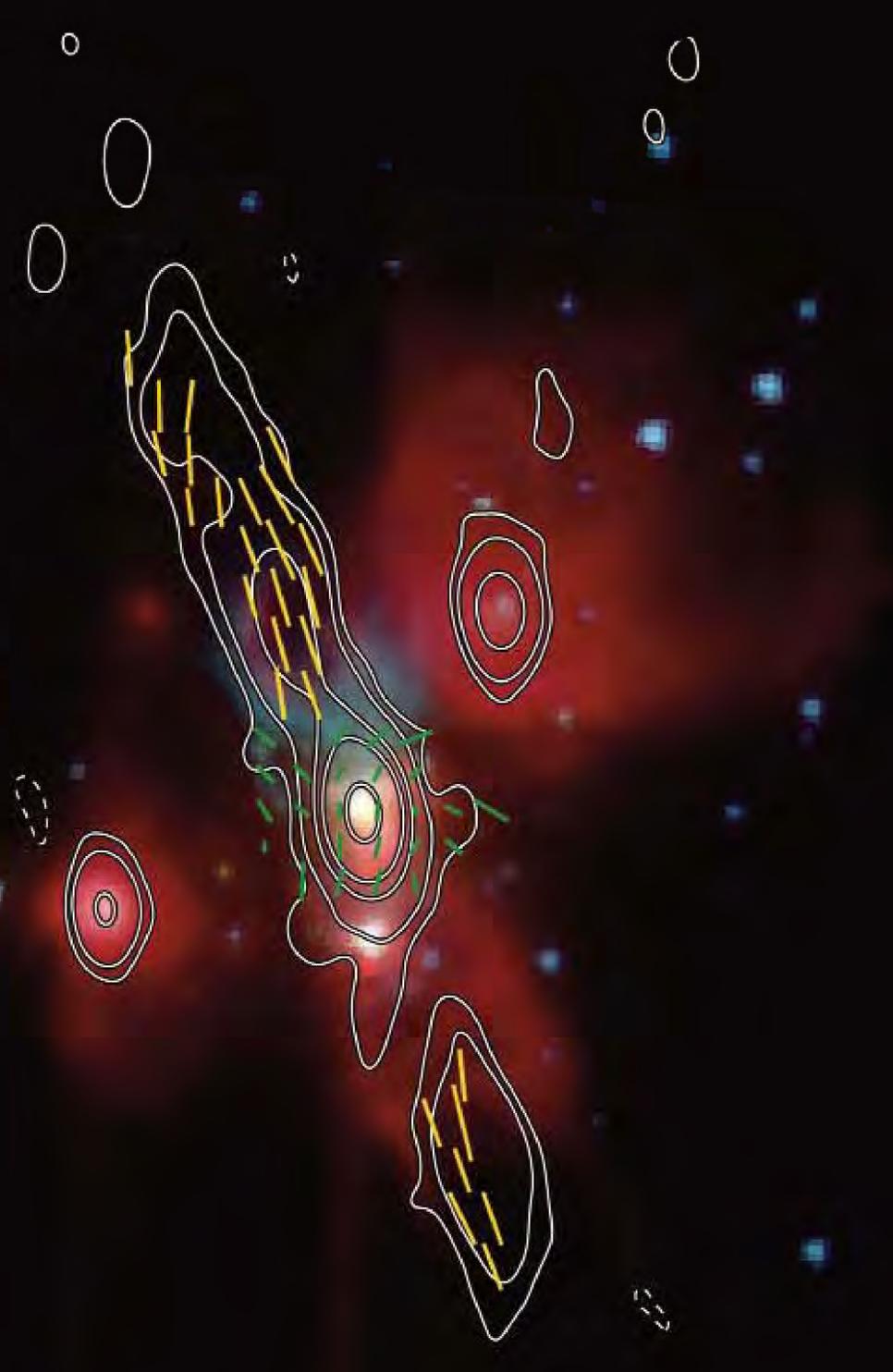
El equipo investigador consiguió medir la distribución e intensidad del campo magnético en el chorro de materia denominado HH 80-81, eyectado por IRAS 18162-2048, una estrella en formación situada a 5500 años luz de la Tierra. Para ello observaron la radiación sincrotrón, producida por electrones viajando a velocidades próximas a la de la luz en presencia de un campo magnético, aplicando el mismo método que se usa para estudiar los chorros eyectados por agujeros negros en núcleos activos de galaxias.

Se trataba de un método innovador en el campo de la formación estelar, ya que hasta entonces se creía que los chorros de materia expulsados por las estrellas en

formación, a pesar de alcanzar velocidades entre 200 y 1000 kilómetros por segundo, eran demasiado lentos para acelerar electrones a velocidades próximas a la de la luz y, por lo tanto, para producir radiación sincrotrón.

“Es admirable que la naturaleza dote de un comportamiento tan parecido a objetos tan diversos, y que un fenómeno que hasta ahora creíamos que era patrimonio exclusivo de objetos exóticos, como los agujeros negros, también se pueda observar en las primeras etapas de la vida de las estrellas normales”, comentaba Guillem Anglada (IAA-CSIC). “Las características del campo magnético en HH 80-81 son muy similares a las encontradas en los chorros de los núcleos activos de galaxias, lo que nos sitúa más cerca de un modelo unificado para todos los objetos astronómicos”, apuntaba Carlos Carrasco-González.

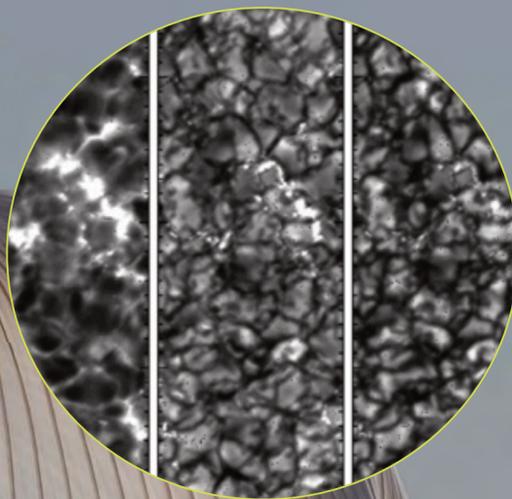
Este modelo requiere, en primer lugar, que exista acreción de materia desde un disco a un objeto central. Es un esquema que comparten los núcleos activos de galaxias, donde el objeto central es un agujero negro supermasivo, y las estrellas en formación, donde el embrión estelar se halla rodeado por un disco gaseoso (precursor de un sistema planetario), por medio del cual se incorpora nuevo material a la estrella. Parte del material del disco, en lugar de caer hacia la estrella central, se expulsa formando unos chorros, cuya estructura viene definida por las líneas de campo magnético. Debido a la rotación del sistema, las líneas de campo magnético se “enrollan”, formando una estructura helicoidal que acelera el material de los chorros y produce su colimación (o el estrechamiento del haz de partículas).



Fondo: imagen en radio del chorro HH80-81, que muestra los dos lóbulos emergiendo de la estrella central. Las líneas amarillas muestran la dirección del campo magnético en el chorro, y las líneas verdes en la envoltura que rodea la estrella. Fuente: Carlos Carrasco-González et al., Curran et al y NASA.

# El magnetismo solar

El Sol es el astro que más influye en nosotros, de modo que es necesario conocerlo y, también, predecir su comportamiento. Y el estudio de su campo magnético, que se halla en el origen de la actividad solar, es una de las vías para conseguirlo



## Misión SUNRISE

La publicación estadounidense *The Astrophysical Journal Letters* recogió en un total de doce artículos sobre los primeros resultados de la misión SUNRISE, un telescopio solar de un metro de diámetro que, durante un viaje de cinco días en globo circunvolando el Ártico, estudió la superficie del Sol con un detalle de unos cien kilómetros, una resolución sin precedentes. La mayoría de los resultados, que ahondaban en la dinámica y el magnetismo de regiones que tradicionalmente se consideraban en calma y revelaban una actividad intensa e inesperada, procedían del instrumento IMAx, un magnetógrafo diseñado y construido íntegramente en España y en el que participó el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC).

El Sol es el astro que más influye en nosotros, de modo que es necesario conocerlo y, además, predecirlo: saber cómo se va a comportar y en qué medida nos va a afectar. La misión SUNRISE se diseñó para abordar uno de los mayores desafíos de la astrofísica actual, el campo magnético solar, que se manifiesta de muy variadas formas, desde las manchas hasta las tormentas solares, y que hoy día se considera la clave para profundizar en el conocimiento del Sol.

Jose Carlos del Toro, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) e integrante del equipo de SUNRISE apuntaba: "Hemos obtenido resultados

espectaculares, la mayoría con datos de IMAx/Sunrise, lo que constituye un verdadero éxito de la misión y de la tecnología desarrollada por el equipo español". Los resultados de SUNRISE no solo aportaban luz a algunos de los antiguos problemas de la física solar, sino que revelaban estructuras y fenómenos desconocidos.

En el primer grupo se sitúa el calentamiento de la cromosfera, la capa inmediatamente superior a la fotosfera (esta podría considerarse la "piel" o superficie del Sol, ya que es la capa que vemos cuando lo miramos): se desconocía por qué, si la temperatura de la fotosfera se estima en 6.000 grados, en la cromosfera se miden temperaturas de hasta 20.000 grados. IMAx/Sunrise halló que en las regiones por debajo de la fotosfera se produce el doble de energía acústica de lo que se pensaba, lo que se acerca a los valores necesarios para explicar el calentamiento cuando dicha energía se transporta hacia arriba. Esta energía se produce por los movimientos convectivos en el Sol, es decir, por material caliente que asciende hacia la superficie, se enfría y vuelve a descender. Esta convección genera cambios de presión que se propagan en forma de ondas que, al transportarse, liberan energía térmica y aumentan la temperatura.

Otro antiguo problema, que databa de los años 70 del siglo pasado, se refería a la

existencia de tubos de flujo magnético a pequeña escala, que se consideran los ladrillos del magnetismo solar pero cuya existencia se había demostrado solo de forma indirecta debido a su reducido tamaño. La inigualable resolución de IMAx/SUNRISE permitió obtener pruebas directas de numerosos de estos tubos magnéticos. Además, un artículo posterior (2014) mostraba el seguimiento de la evolución de uno de estos tubos, que resultó distinta a lo que se proponía hasta la fecha.

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

1997

## El efecto Evershed

Las manchas solares, regiones en las que el campo magnético resta efectividad al transporte de energía (son, por lo tanto, más frías que el entorno), muestran dos zonas: una zona oscura central, denominada umbra, rodeada de otra algo más clara, llamada penumbra, que presenta filamentos brillantes y oscuros extendiéndose de forma radial.

En 1909, el astrónomo John Evershed descubrió flujos de gas en la penumbra, desde el centro de la mancha hacia los bordes, que desaparecían en los límites externos de las manchas.

Sin embargo, el efecto Evershed no obtuvo una explicación hasta 1995, de la mano de un investigador del IAA. "La aproximación que utilizamos para explicar el fenómeno es simple: las estructuras básicas que estudiamos eran tubos magnéticos delgados, con diámetros de unos cien kilómetros y extensiones de unos pocos miles de kilómetros, con una forma de "U" invertida, anclados en la penumbra de la mancha en uno de sus extremos y en la fotosfera en el otro", comenta Benjamín Montesinos, autor del trabajo.

El artículo planteaba que el movimiento de gas en el tubo se genera de forma natural debido a una diferencia de presiones entre sus dos pies. En el modelo se dejaron libres todos los parámetros y la propia estructura de la mancha y de la fotosfera hacían que el tubo tomara la forma que se observa y que las velocidades, temperaturas y campos magnéticos que obtenían coincidieran muy aproximadamente con los observados.

### Referencias:

B. Montesinos, J. H. Thomas *The Evershed effect in sunspots as a siphon flow along a magnetic flux tube*. *Nature*, DOI10.1038/37307

*The Astrophysical Journal Letters*. Volume 723 Number 2.

I. S. Requerey et al. *The history of a quiet-Sun magnetic element revealed by IMAx/SUNRISE*. *Astronomy & Astrophysics*. DOI: <http://stacks.iop.org/0004-637X/789/6>

# Las estrellas han hallado una nueva forma de morir

Un peculiar estallido, acaecido el día de Navidad de 2010, apuntaba a la fusión de dos estrellas, una estrella de neutrones y una estrella gigante, tras una etapa en la que compartieron envoltura

## Un estallido único en una galaxia lejana

El 28 de marzo de 2011, el satélite Swift (NASA) alertaba de la detección de una inusual emisión de rayos gamma. En un principio se creyó que se trataba de un GRB, pero Sw 1644+57 no solo mantuvo su luminosidad, sino que se reactivó otras tres veces en 48 horas y mostró una intensidad nunca vista en todas las longitudes de onda, desde rayos gamma hasta radio. Tras un primer análisis quedó claro que no se trataba de un GRB y que su explicación requería de algún nuevo tipo de fuente desconocida hasta la fecha.

“El escenario más plausible indica que el estallido podría deberse a la ruptura y caída hacia el agujero negro de parte del gas de una estrella próxima, aunque de momento se trata de una hipótesis”, comentaba Juan Carlos Tello, astrónomo del IAA que participó en la investigación, publicada en *Science Express*.

Aunque al principio se ubicó el evento dentro de nuestra galaxia, análisis posteriores lo situaron en una galaxia a unos 3,8 miles de millones de kilómetros de distancia. Los investigadores hallaron que el objeto emitía con fuerza en todo el espectro electromagnético, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio, y lo ubicaron en las densas regiones centrales de la galaxia.

La intensidad, duración y carácter variable Sw 1644+57 lo convertían en un objeto astronómico sin precedentes que, dada su posición, parecía estar relacionado con el agujero negro supermasivo en el núcleo galáctico. El pico máximo de brillo correspondería a un agujero negro de unas diez mil millones de masas solares lo que, sin embargo, supera la masa total de la propia galaxia e indica que en los alrededores del agujero negro debió producirse una intensa fulguración, quizá debido a la ruptura de una estrella en las proximidades (posibilidad que contemplaba otro artículo publicado en la misma edición de *Science Express*).

El día de Navidad de 2010 se produjo un estallido de rayos gamma (o GRB, de sus siglas en inglés) que rompía los patrones existentes. Además de una duración muy superior a la media, GRB101225A -apodado "la explosión de Navidad"- mostró un resplandor posterior cuya causa, a diferencia del resto de GRBs, era de origen térmico. Un grupo internacional de astrónomos, liderado por Christina Thöne y Antonio de Ugarte Postigo, del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), publicó en *Nature* un trabajo que proponía la fusión de dos estrellas, tras una etapa en la que compartieron envoltura, como explicación del fenómeno.

“Todos los GRBs observados hasta la fecha muestran un resplandor posterior, lo que conocemos como *afterglow*, cuya energía procede del movimiento de electrones a gran velocidad dentro del campo magnético del objeto. En cambio, en la explosión de Navidad vimos que el origen de este resplandor era de origen térmico, algo realmente inédito”, declara Christina Thöne (IAA-CSIC).

Hasta ahora había dos mecanismos para

explicar los GRBs, que se ajustaban a las dos modalidades conocidas: los GRBs largos (de dos o más segundos de duración) se deben al colapso de una estrella muy masiva, mientras que los cortos (de menos de dos segundos) se producen por la fusión de dos objetos compactos, como estrellas de neutrones. “El carácter exótico de este GRB prácticamente nos forzaba a sugerir un tercer escenario, e investigamos una amplia gama de posibilidades para explicarlo”, relata Antonio de Ugarte (IAA-CSIC).

El estudio proponía que la explosión de Navidad era el resultado de la fusión de una estrella de neutrones (una estrella degenerada que puede contener la masa del Sol en un radio de decenas de kilómetros) con una estrella gigante evolucionada. Este sistema binario exótico, situado a una distancia de unos 5500 millones de años luz, atravesó una fase de envoltura común cuando la estrella de neutrones se adentró en la atmósfera de la estrella gigante, que durante esta etapa perdió la mayor parte del hidrógeno que la componía. Más tarde, cuando la estre-

lla de neutrones y la gigante se fusionaron, la explosión produjo un chorro semejante a los que se generan en los GRB normales, pero que se calentó por la interacción con la envoltura común preexistente. Esta interacción dio lugar al *afterglow* observado, dominado por radiación generada por material caliente y que fue enfriándose con el tiempo.

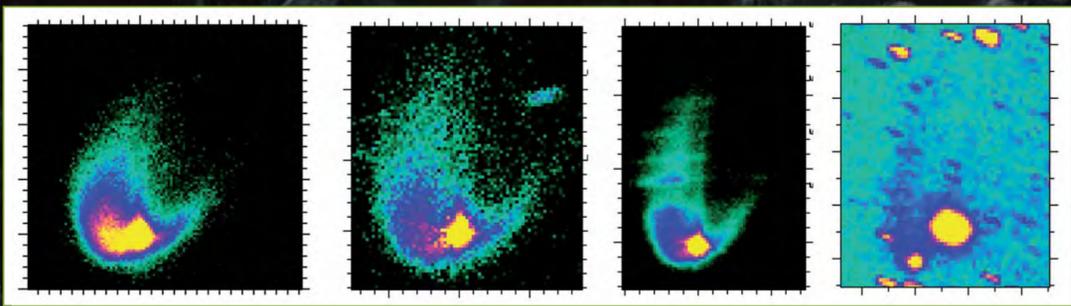
No obstante, un grupo italiano publicaba un artículo en esta misma edición de *Nature* que sugería que el estallido se debió a la ruptura de un objeto menor por una estrella de neutrones situada dentro de nuestra galaxia.

“En 2012 detectamos líneas de emisión en el *objeto persistente*, que lo estableció a un redshift de 0.8, lo que invalidaba el modelo de los italianos. Nuestro redshift también era incorrecto, pero el objeto no estaba dentro de la Vía Láctea. Los teóricos publicaron más estudios y modelos y media tesis fue escrita desarrollando la emisión de cuerpo negro. Hasta hoy no hemos observado otro objeto similar, quizá porque son muy difíciles de detectar”, señala Thöne (IAA-CSIC).

Fondo: concepción artística de la explosión de Navidad. Fuente: A. Simonnet, NASA, E/PO, Sonoma State University.

# Asteroides con cola de cometa

Los asteroides no se caracterizan por exhibir una cola, pero se conocen algunas excepciones como Scheila, cuyo "apéndice" se debió a una ruptura interna o una colisión, o P/2012 F5 (Gibbs), que sufrió un breve evento impulsivo que generó la cola



El asteroide Scheila. Izda: Larson y A. Gibbs (Univ. Arizona/Catalina Sky Survey). Dcha: IAA.

En diciembre de 2010, el asteroide Scheila mostró durante apenas tres semanas rasgos propios de los cometas, con un aumento repentino del brillo y el despliegue de una cola de polvo. Los asteroides del cinturón principal -donde se halla Scheila- giran en torno al Sol en órbitas casi circulares, de modo que no sufren los cambios de temperatura que, en el caso de los cometas, producen las características colas. Un grupo internacional de astrónomos, liderado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), desarrolló un modelo que atribuía la eventual metamorfosis de Scheila al choque con un objeto menor.

"Se barajaban varias explicaciones para este inusual fenómeno -explica Fernando Moreno, investigador del IAA que encabezó el trabajo-, pero dada la brusca disminución de brillo en pocos días lo acotamos a dos: podía deberse a una colisión con otro objeto o a un proceso similar al que se registra en los cometas frecuentemente, y que consiste en la liberación repentina de gas y polvo por algún mecanismo desconocido hasta ahora, que produce a su vez un aumento del brillo".

Sin embargo, el trabajo desarrollado por Moreno y colaboradores descartó esta segunda opción. Gracias a un complejo y preciso modelo numérico hallaron que la velocidad a la que fueron expulsadas las partículas que formaron la cola de Scheila

solo podía explicarse con una colisión, y calcularon que dicha colisión se produjo en torno al 27 de noviembre. Además, estimaron que el impacto expulsó unos veinte millones de toneladas de material y que el objeto que chocó contra Scheila medía entre 60 y 180 metros de diámetro.

## Actividad en el cinturón principal

Scheila se convirtió así en un objeto peculiar por varias razones: se trataba del séptimo objeto de lo que se conoce como "cometas del cinturón principal", es decir, asteroides de esta región que muestran características propias de cometas. Además, constituía un ejemplo de colisión entre asteroides, algo muy poco común: a pesar de lo concurrida que se halla la franja en torno a Marte y Júpiter que ocupan -conocida como cinturón principal de asteroides- y a la abundancia de choques que se produjeron en el pasado remoto del Sistema Solar, hoy día la mayor parte de los asteroides del cinturón principal ocupan órbitas bastante estables, y las colisiones, incluso sobre objetos grandes como Scheila (que mide unos 110 kilómetros de diámetro), son poco frecuentes.

Esta investigación, junto con los hallazgos cada vez más frecuentes de algún tipo de actividad en asteroides (el año pasado se registraron otros dos objetos con aumento súbito de brillo), parece apuntar a que esta región del Sistema

Solar es más activa de lo que se creía.

## El asteroide P/2012 F5 (Gibbs)

Uno de estos objetos, bautizado como P/2012 F5 (Gibbs), se descubrió en marzo de 2012 desde el Observatorio Mount Lemmon en Arizona (EEUU). En mayo y junio de ese mismo año astrofísicos españoles lo siguieron desde el Gran Telescopio Canarias y, mediante cálculos matemáticos, consiguieron deducir cuándo le nació la cola.

"Nuestros modelos indicaban que se produjo por un evento impulsivo de muy corta duración -de tan solo unas pocas horas- en torno al 1 de julio de 2011, con una incertidumbre de 20 días", explica Fernando Moreno, investigador del IAA que participó en el hallazgo.

Las imágenes del telescopio revelaban "una estructura de polvo muy fina y alargada que coincide exactamente con la sincrona de ese día", comenta Moreno. Para una fecha de observación dada, una sincrona es la posición en el plano del cielo de las partículas que libera este tipo de objetos con una velocidad nula en un instante de tiempo. En este caso, la sincrona del 1 de julio de 2011 es la que mejor se ajusta a la delgada cola.

La anchura y la variación del brillo desde la cabeza hasta el final de la cola permitieron a los investigadores deducir las propiedades físicas de las partículas y en qué proporciones se

encontraban las de diferentes tamaños. A partir de los valores del tamaño máximo y de la velocidad de las partículas liberadas, el equipo calculó que el asteroide debía tener de cien a ciento cincuenta metros de radio y que la masa de polvo liberada rondaba el medio millón de toneladas.

Los investigadores barajaron dos posibles hipótesis para explicar el origen de la cola de P/2012 F5: "Podría haber surgido por su colisión con otro asteroide o bien debido a una ruptura rotacional". El segundo mecanismo consiste en el desprendimiento gradual de material tras una fragmentación parcial del asteroide.

Esta, a su vez, se produce por el rápido giro del asteroide que, "como un tiovivo que se acelera", podría ir perdiendo alguna de sus piezas. La velocidad de rotación de los pequeños asteroides puede ir aumentando con el paso de tiempo debido a un efe efecto YORP o de Yarkovsky, que puede inducir una aceleración debido a diferencias térmicas en distintas regiones de la superficie del asteroide, causando eventualmente su ruptura.

Moreno indica que, a partir de la distribución de brillo de la cola, "hemos comprobado que la dependencia de la velocidad de eyección de las partículas con su tamaño es muy débil, en concordancia con lo que ya obtuvimos para otro asteroide de este grupo: el 596 Scheila, que probablemente sufrió una colisión".

Imagen de fondo. Representación artística del choque que produjo la cola del asteroide Scheila. Fuente: NASA/Goddard Space Flight Center/Conceptual Image Lab.

## Referencias:

F. Moreno et al. (596) Scheila in outburst: a probable collision event in the main asteroid belt. *The Astrophysical Journal*, 738:130. DOI: 10.1088/0004-637X/738/2/130  
F. Moreno et al. A short-duration event as the cause of dust ejection from Main-Belt Comet P/2012 F5 (Gibbs). *The Astrophysical Journal Letters* 761 (1) Doi: 10.1088/2041-8205/761/1/L12.

# Los esquivos objetos más allá de Neptuno

Más allá de Neptuno encontramos el cinturón de Kuiper, una región poblada por cuerpos rocosos y helados, entre los que destaca Plutón. Difíciles de observar, estos objetos van desvelando sus características gracias al estudio de lo que se conoce como ocultaciones, o su paso por delante de estrellas lejanas

2011

## Las características de Eris y Makemake

El hallazgo de Eris en 2005 supuso un hito en la caracterización de objetos en el Sistema Solar: los primeros cálculos apuntaban a que su tamaño superaba el de Plutón y, aunque en un principio se habló de décimo planeta, finalmente se impuso una redefinición del concepto de planeta que no incluía ni a Eris ni a Plutón. En una decisión que produjo controversia, la Unión Astronómica Internacional decidió que ambos pasaran a integrar una nueva categoría de objetos, los planetas enanos, reduciendo el número de planetas del Sistema Solar a ocho.

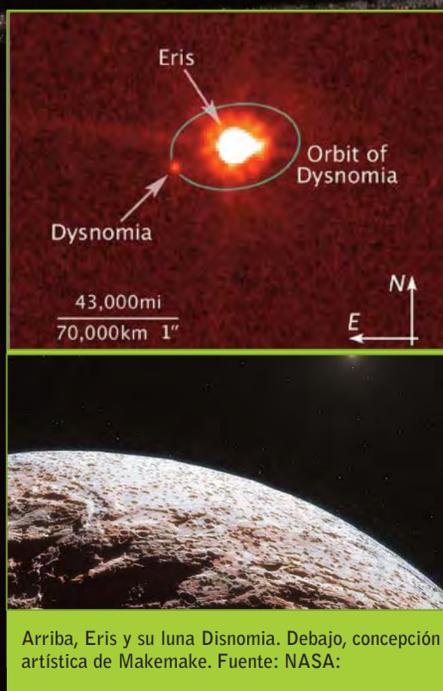
En 2011, un grupo internacional de astrónomos, en el que participó de manera destacada el IAA, estudió el paso de Eris por delante de una estrella y midió su tamaño con más precisión que nunca. Los resultados de este "eclipse" estelar, publicados en la revista *Nature*, reducían considerablemente el tamaño de Eris a unos

1163 kilómetros (muy por debajo de los cálculos anteriores que lo situaban entre 1200 y 1400 kilómetros) y lo convertían, si no en un objeto menor que Plutón, en su gemelo.

De modo que Plutón, con un radio de entre 1150 y 1200 kilómetros, podría conservar el puesto como el mayor objeto de esta región.

### Un planeta enano sin atmósfera

También en 2011 se producía una ocultación por parte de Makemake, uno de los planetas enanos menos conocidos, que permitió determinar con precisión su tamaño, forma y albedo, o fracción de luz reflejada. La ocultación reveló que, a diferencia de Plutón, Makemake carece de atmósfera. "No obstante -señalaba José Luis Ortiz, investigador del IAA que encabezaba el estudio-, cabe la posibilidad de que pueda albergar zonas donde



Arriba, Eris y su luna Dysnomia. Debajo, concepción artística de Makemake. Fuente: NASA:

se forme una atmósfera local". El albedo de Makemake (77%) es superior al de Plutón (52%) pero inferior al de Eris (96%), y se cree que el alto brillo de este último se debe a que su atmósfera se condensó en la superficie, cubriéndola de hielo. El albedo de Makemake sería coherente con la existencia de una atmósfera parcial que hubiera colapsado sobre la superficie y producido los dos tipos de terreno -unos más brillantes y otros más oscuros- que los datos térmicos indican.

"Todo esto es consistente con la idea de que la atmósfera de Plutón se produce por sublimación de los hielos de la superficie y hace pensar que Makemake podría desarrollar una atmósfera similar cuando se acerque a su perihelio -cuando al seguir su órbita muy elíptica llegue al punto de máxima aproximación al sol-", concluía Ortiz.

2014

## Anillos en un cuerpo que no es un planeta

Parecía que los sistemas de anillos eran un rasgo exclusivo de los planetas gigantes, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Sin embargo, un pequeño objeto de apenas doscientos cincuenta kilómetros de diámetro ingresó en 2014 en ese reducido grupo: una ocultación estelar mostraba que (10199) Chariklo (Cariclo en castellano), un planeta menor situado entre Saturno y Urano, presenta dos densos anillos, posiblemente formados por hielo de agua. El hallazgo, publicado en la revista *Nature*, implicaba que los anillos pueden ser estructuras más comunes de lo que se pensaba, al menos en las regiones más externas del Sistema Solar.

El descubrimiento fue posible gracias a la observación, desde ocho enclaves distintos, del paso de Cariclo por delante de una estrella -una ocultación-, que en este caso produjo resultados inesperados. Además de los eventos típicos, correspondientes al comienzo y final de la ocultación, los as-

trónomos hallaron otros dos eventos breves difíciles de explicar.

"Estábamos muy sesgados por la idea de que los eventos breves de ocultación se debieran a material que Cariclo pudiera expulsar en chorros, como lo hacen los cometas, ya que este objeto tiene algunas propiedades y hasta la órbita parecida a las de los cometas", apuntaba José Luis Ortiz, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que participó en el hallazgo.

"Tras dar muchas vueltas a los datos me di cuenta de que estábamos detectando material que se distribuía en una elipse alrededor de Cariclo, formando un anillo como el de Saturno. En ese momento todo empezó a aclararse y no solo encajaron todas las piezas del puzzle, sino que pudimos explicar otros fenómenos extraños que se habían observado años antes", continuaba el astrónomo.

Cariclo es el mayor de una población de

objetos conocidos como centauros, que se distribuyen en una extensa región entre Júpiter y Neptuno y que comparten características tanto con los cometas como con los asteroides. Entre 1997 y 2008 Cariclo mostró un, hasta ahora, inexplicable descenso de brillo, acompañado de la desaparición de la señal que indica la presencia de hielo.

"Creemos que el hielo de agua no se encuentra en la superficie de Cariclo, sino en su sistema de anillos. Y cuando no se detectó el hielo fue precisamente en un momento en el que los anillos se hallaban de canto, de forma que apenas se veían porque son muy finos", detallaba René Dufard, investigador del IAA-CSIC que participó en el hallazgo. "Sabemos que los anillos de Saturno están formados por hielo de agua en un gran porcentaje, así que los de Cariclo serían una versión pequeña de los anillos de Saturno". Los anillos, separados por una zona estre-

cha y oscura, muestran una anchura de siete y cinco kilómetros respectivamente y presentan una masa total equivalente a un cuerpo helado de cuatro kilómetros de diámetro. Su posición indica que o bien se trata de un sistema formado recientemente o bien que existe un cuerpo, lo que suele conocerse como "satélite pastor", que contribuye a que los anillos permanezcan confinados pero que aún no se ha detectado.

Los astrónomos barajaron varias explicaciones sobre el origen de los anillos, pero creen que es muy posible que tengan relación con la existencia de satélites, que pudieron impactar y generar un disco de "escombros" en torno a Cariclo. El hallazgo fue posible gracias a una red de telescopios distribuida entre Chile, Brasil, Argentina y Uruguay, algunos de los que fueron utilizados en remoto desde Granada por el observador del grupo de investigación del IAA-CSIC Nicolás Morales.

### Referencias:

- B. Sicardy et al. *A Pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet Eris from an occultation.* Nature. DOI 10.1038/nature10550  
J.L.Ortiz et al. *Albedo and atmospheric constraints of dwarf planet Makemake from a stellar occultation.* Nature. DOI 10.1038/nature11597  
F. Braga-Ribas et al. *A ring system discovered around the asteroid-like object (10199) Chariklo.* Nature. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nature13155>

# Más allá de la troposfera

Hace medio siglo se pensaba en la atmósfera como un conjunto de capas aisladas, donde el clima se desarrollaba en los primeros quince kilómetros de altura (la troposfera). Hoy en día sabemos que la atmósfera es un sistema altamente acoplado, donde fenómenos que ocurren en determinadas alturas pueden transferirse a otras capas y afectar a fenómenos tan importantes como el propio clima

2011

## “Relámpagos” en la mesosfera

Hace dos décadas se descubrió un asombroso fenómeno: se observaron intensos destellos en la mesosfera, una región de la atmósfera situada a partir de los cincuenta kilómetros por encima del suelo y que se creía carente de actividad. Relacionados con los rayos de tormenta pero situados decenas de kilómetros sobre las nubes, resultaba inexplicable que algunos de estos destellos, los conocidos como *sprites* retardados, se produjeran con retraso con respecto al rayo que los desencadenaba. Un trabajo, desarrollado por los investigadores del IAA-CSIC Alejandro Luque y Francisco J. Gordillo y publicado en *Nature Geoscience*, aportó la clave que faltaba en los modelos de iniciación de los *sprites*. Los *sprites* son eventos luminosos que duran centésimas de segundo y que muestran una parte superior difusa y una región inferior poblada de “tentáculos” (filamentos de aire ionizado de entre diez y cien

metros de grosor). Pueden extenderse desde los cuarenta hasta los casi cien kilómetros sobre el suelo y se producen simultáneamente al rayo que los desencadena o con cierto retraso. “Los *sprites* retardados eran la prueba de que nuestro conocimiento era incompleto: no podíamos explicar que, en lugar de producirse entre dos y tres milisegundos después del rayo, se demoraran hasta 150 milisegundos”, apuntaba Francisco J. Gordillo (IAA-CSIC). Para que se produzca una descarga en la mesosfera es necesaria la existencia de electrones libres, partículas que surgen y se eliminan a través de dos reacciones conocidas como ionización por impacto y fijación asociativa. “Los modelos empleados hasta ahora aseguraban que era necesario cierto campo eléctrico para que se produjeran más electrones de los que se destruían”, señalaba Alejandro Luque (IAA-CSIC). “Esto funciona a presión atmosférica, es

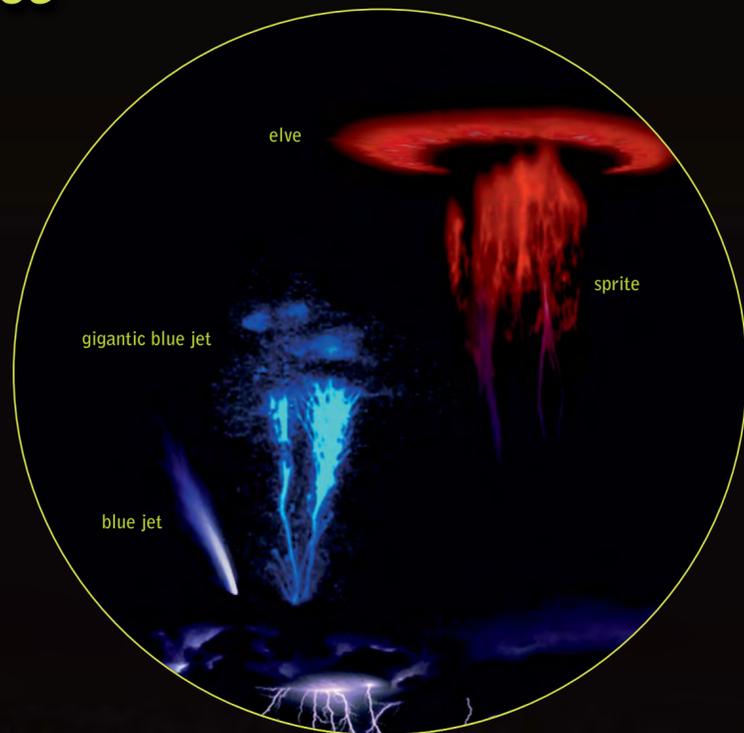
decir, en las capas bajas de la atmósfera, pero no era suficiente para estudiar las descargas en la mesosfera, mucho más alta y con una presión considerablemente menor”, observaba Luque. Los científicos del IAA hallaron que, para alturas de más de quince kilómetros, entraba en juego una tercera reacción, la de desprendimiento asociativo, que ponía electrones en circulación y completaba las teorías existentes. “Esta reacción nos permite explicar el retraso de algunos *sprites*, porque su tiempo característico concuerda con los retrasos observados”, concluía Francisco J. Gordillo.

### De la nube a la mesosfera

Un *sprite* se produce así: una nube de tormenta presenta carga eléctrica negativa en la parte inferior y positiva en la superior. Generalmente, los rayos emergen de la región inferior y muestran polaridad

negativa, pero en ocasiones surgen rayos con polaridad positiva, mucho más potentes y peligrosos. Estos últimos producen un campo eléctrico que asciende hacia las capas altas atmosféricas y que desencadena el *sprite*.

Los *sprites* constituyen un tipo dentro una amplia familia de fenómenos eléctricos que tienen lugar en la mesosfera, que se conocen como Eventos Luminosos Transitorios (TLEs, de sus siglas en inglés) y entre los que se encuentran también los *elves*, los *halos*, los *blue jets* o los *gigantic blue jets* (imagen superior). El descubrimiento de estos eventos cambió radicalmente la imagen de la mesosfera, que se consideraba carente de fenómenos físicos relevantes. La influencia de los TLEs en las propiedades de la alta atmósfera es actualmente objeto de investigaciones realizadas por grupos de todo el mundo.



2015

## La concentración de CO<sub>2</sub> también aumenta en la alta atmósfera

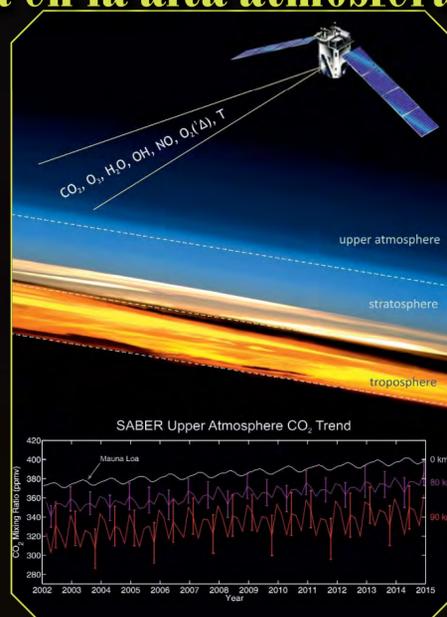
El aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que calienta la capa inferior de la atmósfera (troposfera) y produce lo que globalmente se conoce como cambio climático, también afecta a las capas altas de la atmósfera.

“El CO<sub>2</sub> es un gas con una vida media larga: cada nueva molécula que se produce permanecerá más de un siglo en la atmósfera -señala Manuel López Puertas, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que participó en el estudio y que codirige el instrumento SABER-. Y el dióxido de carbono de la baja atmósfera se transporta hacia las capas altas en un margen de tiempo de entre cinco y siete años, de modo que cualquier incremento tendrá una influencia también en la alta atmósfera”.

### Un mismo gas, diferentes efectos

Los datos de SABER mostraban un aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> del 5% por década hasta una altura de ochenta kilómetros (estratosfera y mesosfera), una medida similar a la obtenida en la troposfera, y un aumento de hasta el 12% a unos ciento diez kilómetros (baja termosfera).

En la troposfera, la capa que abarca los primeros doce kilómetros de la atmósfera y donde se producen los fenómenos climáticos, el dióxido de carbono se comporta como un gas de efecto invernadero y su incremento produce un aumento de temperatura. Sin embargo, en las capas medias y altas la situación se invierte y el CO<sub>2</sub> produce un enfriamiento. El aumento del dióxido de carbono en



estas capas atmosféricas produce un enfriamiento, lo que hace que se contraigan. Así, las capas altas de la atmósfera se hacen más tenuous (menos densas), lo que podría alargar la vida media de los satélites artificiales de baja órbita al tener un menor frenado. Igualmente, esta contracción podría tener consecuencias adversas en el ya inestable equilibrio orbital de la basura espacial. “Este resultado viene a poner nuevamente de manifiesto el carácter acoplado de la atmósfera terrestre. Las emisiones de CO<sub>2</sub> están produciendo un cambio en la temperatura de las distintas capas y en el equilibrio energético de la atmósfera que pueden alterar su propia estructura”, concluye López Puertas (IAA-CSIC).

### Referencias:

A. Luque, F.J. Gordillo-Vázquez. Mesospheric electric breakdown and delayed sprite ignition caused by electron detachment. *Nature Geoscience*. doi:10.1038/ngeo1314  
J. Yue et al. "Increasing carbon dioxide concentration in the upper atmosphere observed by SABER". *Geophysical Research Letters*. DOI: 10.1002/2015GL064696

# La evolución química del universo a lo largo de diez mil millones de años

Se concluye que las galaxias más distantes tienen menor proporción de elementos pesados que las del universo local, lo que confirma el modelo jerárquico de formación de galaxias

Existe un enorme abismo entre la composición química del universo primigenio, prácticamente formado por hidrógeno (93%) y helio (7%), y la composición actual, con proporciones variables de una larga lista de elementos (carbono, oxígeno, hierro, nitrógeno...). El estudio de la evolución química de las galaxias resulta esencial para la comprensión de la historia del universo, y un estudio despejó, en 2012, dudas al respecto: las galaxias más distantes, -y, por lo tanto, más jóvenes- tienen menor proporción de elementos pesados que las del universo local, confirmando así el modelo que afirma que las grandes galaxias se formaron a partir de la fusión de otras más pequeñas.

Fueron las estrellas las que, a través de las reacciones nucleares que se producen en su centro, operaron el cambio y aumentaron la proporción de metales (en astrofísica, los elementos más pesados que el hidrógeno y el helio). "Es como una fábrica, un enorme horno en el que el hidrógeno da lugar a elementos más pesados, que se liberan al medio a través de vientos y de explosión de material en las explosiones de supernova", apunta Enrique Pérez Montero, investigador del IAA-CSIC que lideró el estudio.

El estudio de la evolución química de las galaxias resulta esencial para la comprensión de la historia del universo, y se estudia a través de lo que se conoce como "relación masa metalicidad", que analiza la proporción de elementos pesados que contiene una galaxia con respecto a la masa total de estrellas que presenta. Dicha relación está

bien establecida en el universo local: se sabe que las galaxias enanas son menos metálicas que las masivas. "La cuestión era analizar si esa relación ha sido igual a lo largo de todas las etapas cosmológicas o ha ido sufriendo una evolución. Empezaron a hacer mediciones y se observó que las galaxias en épocas jóvenes del universo tendían a tener menos contenido en metales", señala Enrique Pérez Montero (IAA-CSIC). Sin embargo, en 2010 un estudio desmintió estos resultados aludiendo a un sesgo relacionado con la cantidad de estrellas por unidad de tiempo que las galaxias son capaces de formar. Una alta tasa de formación estelar suele ir acompañada de una metalicidad menor, ya que en muchas galaxias la formación estelar se dispara debido a la captura de gas poco procesado, lo que reduce la proporción total de elementos complejos.

Dado que, precisamente, las galaxias con brotes de formación estelar son las más brillantes y, por lo tanto, más fácilmente detectables a grandes distancias, los investigadores concluyeron que el contenido en metales había permanecido constante a lo largo de la historia cosmológica y que lo que se había interpretado como evolución era un efecto de selección.

#### Se confirma la evolución

Pero el artículo de Pérez Montero y colaboradores desmintió esa deducción. Por un lado, calculó y corrigió la tasa de formación estelar para evitar sesgos; y, por otro, en lugar de ceñirse solo al contenido en oxígeno, que es el empleado habitualmente y

que depende de la formación estelar, estudió el cociente entre nitrógeno y oxígeno - independiente de la tasa de formación estelar- para determinar la cantidad de metales en las veinte mil galaxias del muestreo zCOSMOS.

"Con este muestreo medimos la metalicidad a lo largo de los últimos diez mil millones de años, algo nunca conseguido, y confirmamos que cuando el universo era más joven la relación masa metalicidad era más plana: las grandes y las pequeñas tenían una proporción de metales similar, al contrario de lo que ocurre en el universo local", concluye Pérez Montero (IAA-CSIC). La evolución de la relación masa metalicidad constituye una evidencia del modelo jerárquico de formación de galaxias, que sostiene que en el universo primitivo las galaxias grandes se formaban como fusión de galaxias pequeñas con metalicidad baja origina una galaxia con el doble de masa estelar pero con la metalicidad de las pequeñas; aunque la fusión dispara la tasa de formación estelar, debe transcurrir tiempo hasta que las estrellas generen metales, los liberen y doten a la galaxia de la metalicidad que le corresponde para su masa.

"El hecho de que la relación masa metalicidad sea más plana en el universo más joven indica que las fusiones eran más frecuentes en el universo primigenio y eso confirma el modelo jerárquico. Si las galaxias se hubieran formado de forma aislada la relación masa metalicidad sería la misma en cualquier época que miraras", concluye Pérez Montero (IAA-CSIC).

## IZw18 y el pasado del universo

IZw18 es la galaxia más pobre en metales del universo cercano, y una de las que más se asemeja a las primeras galaxias.

Se ha descubierto en esta pequeña galaxia una región muy extensa de helio ionizado, algo más frecuente en galaxias muy distantes y con poca abundancia de metales. La ionización del helio requiere la presencia de objetos que emitan una radiación lo suficientemente intensa como para arrancar los electrones de los átomos de helio. "En este trabajo damos una nueva interpretación para el origen de esta radiación en la galaxia IZw18, un tema que sigue siendo una incógnita", apunta Carolina Kehrig, investigadora del IAA que encabezó el estudio.



"Nuestros datos apuntan a que estrellas extremadamente calientes, como estrellas supermasivas de baja metalicidad o estrellas masivas prácticamente sin metales, pueden esconder la clave para resolver el problema de la excitación del helio en IZw18, aunque la existencia de estas estrellas aún no ha sido confirmada observacionalmente", señala Kehrig (IAA-CSIC).

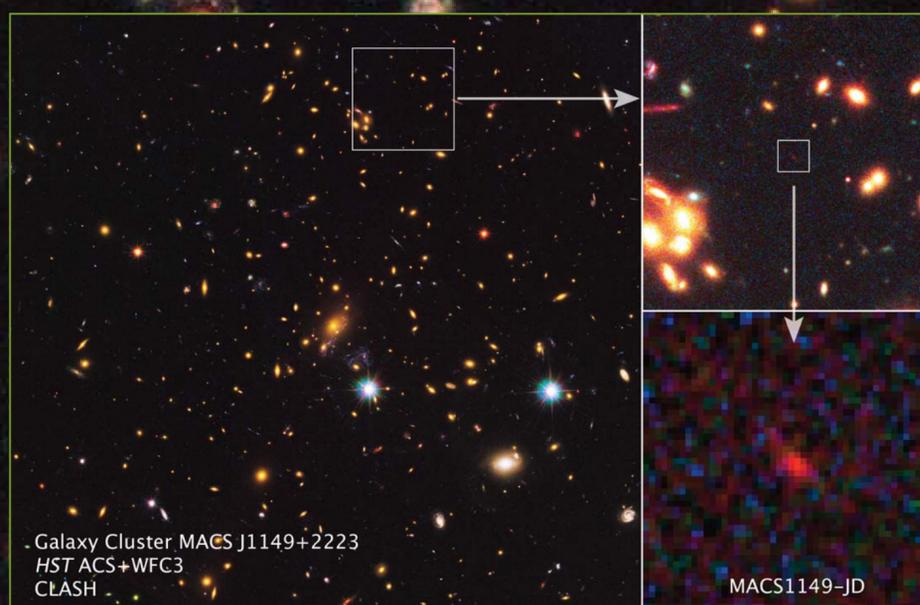
Se trataría de estrellas muy calientes análogas a las estrellas de primera generación, compuestas solo por hidrógeno y helio y con cientos de veces la masa del Sol. Se cree que estas estrellas jugaron un papel decisivo en la "reionización" del universo, época durante la que las primeras estrellas y galaxias se hicieron visibles y aún poco conocida.

Este estudio muestra cómo es posible desentrañar información del pasado del universo en nuestro propio vecindario galáctico.

# La galaxia formada apenas 200 millones de años después del Big Bang

La galaxia MACS1149-JD data de la reionización, una etapa aún poco conocida pero fundamental para trazar la historia del universo. La detección fue posible gracias al efecto magnificador, similar al de una lente, de un cúmulo de galaxias situado en la trayectoria de su luz

Combinación de imágenes de los telescopios espaciales Spitzer y Hubble. La imagen de la izquierda muestra las numerosas galaxias del cúmulo MACS J1149+2223, que funciona como una gran lente que magnifica unas quince veces el brillo de MACS 1149-JD (en el recuadro).  
Fuente: NASA/ESA/STScI/JHU



Un grupo de astrónomos halló en 2012 una galaxia que data de la reionización, una época del universo aún inexplorada -se halla fuera de la sensibilidad de los telescopios-, pero cuyo conocimiento resulta esencial para trazar la historia cosmológica. El hallazgo, realizado con los telescopios espaciales Hubble y Spitzer y publicado en *Nature*, fue posible gracias al efecto de lente gravitatoria producido por un cúmulo de galaxias situado en la trayectoria de la luz de MACS1149-JD, la galaxia recién detectada, cuya luminosidad se vio magnificada.

La observación del universo lejano implica adentrarse en su pasado: debido al tiempo que la luz tarda en alcanzarnos, vemos el Sol cuando era ocho minutos más joven. Así, si la luz de una galaxia ha tardado en alcanzarnos trece mil doscientos millones de años estamos viéndola tal y como era en el universo primitivo (el universo tiene una edad estimada de 13.800 millones de años). Ese es el caso de MACS 1149-JD, una galaxia

muy débil que se halla entre las galaxias más distantes conocidas.

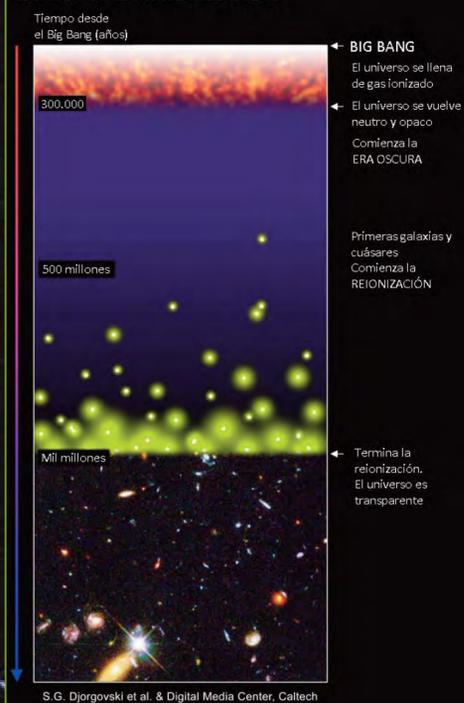
“La mayor parte de los objetos de este tipo que se conocen son extremadamente débiles, y no se puede decir mucho sobre ellos más allá de que existen -señala Txitxo Benítez, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía que participó en la investigación-. Sin embargo, la luz que nos llega de MACS1149-JD está amplificada casi quince veces por el efecto de lente gravitatoria del cúmulo que se encuentra en su camino y que actúa como una lupa cósmica. Esto nos permitirá estudiarlo en mucho más detalle con otros telescopios y, por tanto, caracterizar las propiedades de las primeras galaxias que aparecieron después del Big Bang”.

Los investigadores calculan que MACS1149-JD pudo formarse hace unos 13.500 millones de años, lo que la sitúa en una etapa verdaderamente interesante: se estima que las primeras estrellas surgieron entre los cien y los doscientos cincuenta millones de años

tras el Big Bang y que fueron las responsables de la reionización del medio interestelar, poniendo fin a la “era oscura”. La luz ultravioleta de aquellas primeras estrellas comenzó a ionizar los átomos de hidrógeno neutro que poblaban el universo (y que absorbían la radiación, de ahí la “era oscura”) y el universo fue, paulatinamente, haciéndose transparente a la radiación -es decir, observable-.

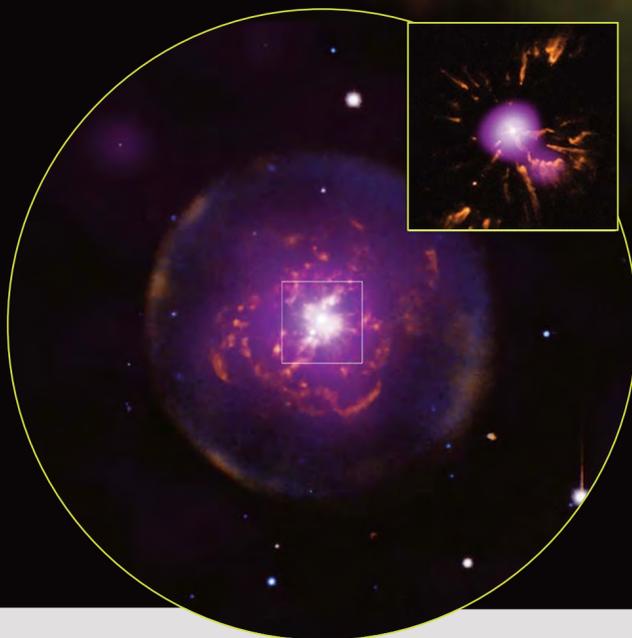
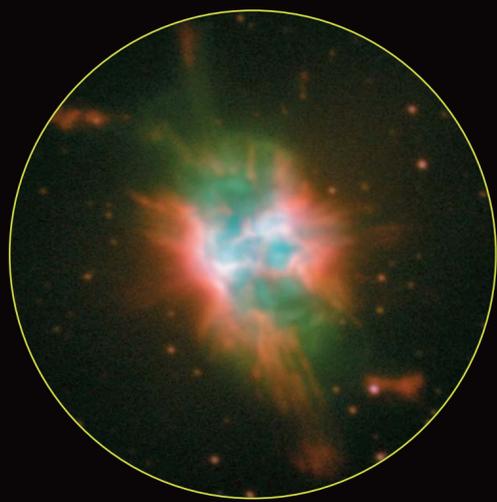
Así, galaxias como MACS1149-JD, cuya cronología encaja en la época de la reionización, tuvieron un papel fundamental en la historia del cosmos. El reciente hallazgo se enmarca en el proyecto CLASH (*Cluster Lensing and Supernova survey With Hubble*), cuyo objetivo principal reside en aportar luz sobre la materia y energía oscuras y que lleva a cabo un estudio en detalle de veinticinco cúmulos de galaxias. Uno de ellos, MACS J1149+2223, causante de la amplificación de la luz de MACS1149-JD, constituye una de las lentes más poderosas conocidas.

## LA ERA DE LA REIONIZACIÓN



# Nebulosas planetarias: esos (aún) misteriosos objetos

Conocemos cómo se forman las nebulosas planetarias, pero aún quedan incógnitas, el escenario general no encaja en algunos de estos objetos, y otros sufren procesos excepcionales



Arriba, NGC 2392, más conocida como la Nebulosa del Esquimal. La emisión en rayos X viene señalada en azul. Fuente: Chandra y HST.  
En el centro: Abell 30, una de las cuatro nebulosas planetarias renacidas que se conocen (NASA/ESA). Derecha: NGC 6778.

Las estrellas obtienen su energía de las reacciones termonucleares que convierten el hidrógeno del núcleo en helio. Al agotarse el hidrógeno, la estrella comienza a hundirse bajo su propio peso, proceso que calienta las capas externas, que se dilatan y expanden. La estrella aumenta su radio casi cien veces y comienza la etapa de gigante roja.

En el caso de estrellas de masa intermedia, como el Sol, las reacciones nucleares prosiguen y el helio da lugar a carbono y oxígeno, pero la dilatación de la envoltura continúa hasta que el núcleo pierde control sobre ella y se expande libre en el espacio. El núcleo, muy caliente, produce radiación ultravioleta y un viento estelar muy veloz que, al interactuar con el material de la envoltura, hacen que emita luz.

#### La nebulosa que renació

Así se formó, hace doce mil quinientos años, Abell 30, una nebulosa planetaria que presenta un cascarón brillante y una estrella central -una enana blanca con un núcleo de carbono y oxígeno, una capa de helio y otra, más superficial, de hidrógeno. Pero, con el tiempo, las reacciones termonucleares en la capa de hidrógeno alimentaron la capa inferior hasta que se encendió la fusión de helio, lo que produjo la eyección de parte del material de dichas capas y una dilatación tal que la estrella retomó las características de una gigante roja

(entre ellas, la emisión de un viento estelar de baja velocidad). Tras esta segunda fase de gigante roja, que duró entre cinco y veinte años, la estrella volvió a contraerse y comenzó a emitir un viento estelar muy veloz, compuesto por partículas que podían alcanzar los cuatro mil kilómetros por segundo. "El material eyectado durante el estallido es ahora barrido por el viento de la estrella e ionizado por su radiación ultravioleta para formar estructuras que recuerdan a los cometas del Sistema Solar, solo que sus colas son miles de veces mayores, y que emiten en rayos X", apuntaba Martín Guerrero, investigador del IAA que lideró la investigación.

#### ¿Es la estrella central de la Nebulosa del Esquimal un sistema binario?

Las nebulosas planetarias constituyen un bellísimo ejemplo de interacción de vientos estelares, donde flujos de gas a distintas temperaturas y velocidades producen una característica estructura: una cavidad central compuesta por un viento muy veloz y caliente, un cascarón brillante formado un viento más denso y frío y una envoltura externa. Entre las dos primeras debería existir una capa de transición que transmite el calor producido por el choque de vientos. La existencia de dicha capa fue confirmada en un estudio que, además, revelaba la existencia de una posible compañera de la estrella central de la Nebulosa

del Esquimal.

El estudio analizó tres nebulosas, pero en la del Esquimal hallaron serias discrepancias: la estrella central no genera vientos suficientemente energéticos para que se produzcan rayos X (que, sin embargo, sí se detectan) y su burbuja se expande a noventa kilómetros por segundo, más del doble de la velocidad media en objetos similares. "Hay algo que está aportando energía extra y pensamos que pudiera tratarse de una compañera binaria que aún no se ha podido detectar de forma directa", concluía Nieves Ruiz (IAA-CSIC), que dirigía el trabajo.

#### NGC 6778: la nebulosa planetaria que se rompió

Se cree que la interacción del viento estelar que emana del núcleo, tenue y veloz, con el viento emitido en la fase anterior, más denso y lento, es lo que determina la forma que finalmente presentará la nebulosa. "Sin embargo, ya se habían detectado estructuras, como flujos de material muy estrechos y veloces, que requerían ampliar ese escenario de vientos en interacción para comprender cómo adoptan su forma las nebulosas planetarias", matizaba Martín Guerrero (IAA-CSIC) tras publicar un resultado sobre NGC 6778.

Se trata de una nebulosa planetaria cuya estrella central es en realidad un sistema formado por dos estrellas -una estrella bi-

naria-, que giran en torno a un centro común a una distancia tan reducida que llegaron a compartir la misma envoltura. La nebulosa muestra una forma de "S" dibujada por los flujos de material, cuyos extremos se hallan distantes de la región central (donde se aprecia un anillo ecuatorial muy fragmentado y sendos lóbulos bipolares, también con indicios de ruptura). Las observaciones aportadas en este estudio ofrecieron una visión más definida de algunas características ya conocidas de NGC 6778 y, además, revelaron nuevos e interesantes rasgos, como una especie de jirones que emergen de las regiones ecuatoriales o estructuras que recuerdan a los cometas, con su núcleo brillante y su cola. Dichas estructuras, al igual que el estado fragmentario del anillo y los lóbulos, constituyen una clara evidencia de la existencia de interacciones dinámicas muy fuertes en la nebulosa planetaria, quizá originadas por un evento explosivo (quizá una súbita eyección de masa), que produjo los flujos de material.

"NGC 6778 representa un caso singular en el que estos flujos pueden ser asociados con la evolución en una fase de envoltura común de la estrella central binaria", señala Guerrero (IAA-CSIC). "Además, podemos decir que los distintos flujos NGC 6778 han intervenido de forma crucial en la formación y evolución de esta nebulosa planetaria", concluye el astrónomo.

#### Referencias:

- M. Guerrero, L. Miranda. *NGC 6778: a disrupted planetary nebula around a binary central star*. *Astronomy & Astrophysics*. DOI: 10.1051/0004-6361/201117923  
M. Guerrero et al. *Rebirth of X-ray Emission from the Born-Again Planetary Nebula A30*. *The Astrophysical Journal*. DOI:10.1088/0004-637X/755/2/129  
N. Ruiz et al. *Detection of diffuse X-ray emission from planetary nebula with nebular O VI*. *The Astrophysical Journal* DOI: 10.1088/0004-637X/767/1/35

# La actividad en los núcleos galácticos

Las galaxias activas destacan porque su energía, muy superior a la que pueden producir sus estrellas, se halla concentrada en la región central. El modelo unificado agrupó los distintos tipos (cuásares, radiogalaxias, seyfert...) bajo un escenario común, pero aún no está completo del todo

2013

## Un agujero negro supermasivo, su dieta y su galaxia

La mayoría de las galaxias alberga un agujero negro supermasivo en su centro (con masas de hasta miles de millones de soles) que, al atraer el gas circundante, puede desatar lo que se conoce como actividad nuclear y que involucra una gran liberación de energía. Pero, ¿cómo se transporta el gas hacia las regiones centrales de las galaxias para alimentar el agujero negro supermasivo? ¿afecta el crecimiento del agujero negro a la evolución de la galaxia que lo alberga?

Un grupo internacional de astrónomos respondió ambas preguntas gracias a la resolución del telescopio ALMA. Observaron en detalle NGC 1433, una galaxia espiral con una configuración compleja. Además de

dos anillos externos y una barra primaria - una estructura en forma de barra que alberga estrellas y transporta gas-, muestra en la región central una versión en miniatura de lo anterior formada por un anillo y una barra nuclear.

“Los datos de ALMA mostraban que el gas en la zona central de NGC1433 sigue una estructura espiral dentro del anillo nuclear que explicaría cómo el gas es conducido hacia el núcleo y alimenta la actividad nuclear”, ilustra Isabel Márquez, investigadora del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que participó en el estudio.

La presencia de dos barras parece fundamental, como ya apuntaba el programa NUGA (*Nuclei of Galaxies*) desarrollado por

el mismo grupo de investigadores para estudiar la distribución del gas en galaxias activas y el abastecimiento del agujero negro central. Hallaron que el mecanismo de alimentación más común en las galaxias de la muestra reside en la existencia de una barra primaria con rotación lenta y de una barra nuclear que rota más rápidamente, de modo que se producen resonancias dinámicas que hacen que el gas fluya hacia el centro. La dinámica del gas en NGC 1433 parece confirmar este escenario.

### Retroalimentación del agujero negro

Sin embargo, también observaron que parte del gas molecular, algo menos de un 10%, es expulsado a través de un chorro

que emana de una región cercana al núcleo y que eyecta la masa equivalente a siete soles por año. “Puesto que los procesos de formación estelar, en algunas galaxias responsables de este tipo de fenómenos, no son muy intensos en NGC 1433, pensamos que el responsable de este flujo es el propio núcleo activo”, señala Isabel Márquez (IAA-CSIC). “Este descubrimiento confirma la idea de que la actividad nuclear puede extraer gas del centro y frenar la formación estelar. El agujero negro supermasivo podría así regular el crecimiento de los bulbos en los centros de las galaxias, lo que explicaría la relación observada entre la masa de los bulbos y de los agujeros negros centrales”, concluye la investigadora.



La galaxia NGC 1433 observada por Hubble (de fondo) y ALMA. Fuente: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/NASA/ESA/F. Combes.

2014

## Los cuásares “tranquilos”

En el pasado remoto el universo era muy diferente: las fusiones de galaxias eran habituales y en sus núcleos se formaron gigantes agujeros negros, de miles de millones de masas solares que, al absorber el gas de su entorno, comenzaron a emitir energía. Estos cuásares, objetos muy lejanos y tremendamente energéticos, tienen un pariente local mucho menos energético cuya existencia plantea varias cuestiones: ¿existen también a grandes distancias cuásares “tranquilos”? ¿son los segundos versiones ya apagadas de los primeros o se trata de objetos diferentes?

La luz de los cuásares distantes ha tardado miles de millones de años en alcan-

zarnos, de modo que estamos viendo el pasado del universo. “Los astrónomos siempre hemos querido comparar pasado y presente, pero esto ha resultado casi imposible porque a grandes distancias solo podemos ver los objetos más brillantes -apunta Jack W. Sulentic, astrónomo del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que encabezaba la investigación-. Hasta ahora hemos comparado cuásares lejanos muy luminosos con los cercanos y débiles, lo que equivale a comparar las bombillas de casa con los focos de un estadio de fútbol”.

Los cuásares parecen mostrar una evolución con respecto a la distancia ya que, según nos alejamos, los cuásares poco

luminosos de nuestro entorno van dejando paso a objetos cada vez más brillantes. Esto podría deberse a un proceso evolutivo, que indicaría que los cuásares se apagan con el tiempo, o a un simple sesgo observacional que enmascarara otra realidad: los cuásares monstruosos y de rápida evolución, muchos ya extintos, conviven con una población tranquila que evoluciona a un ritmo mucho más pausado pero que, debido a las limitaciones tecnológicas, aún no hemos sido capaces de investigar.

Para resolver esta cuestión era necesario buscar a grandes distancias cuásares de baja luminosidad y comparar sus características con las de los cuásares cerca-

nos con igual luminosidad. Algo hasta ahora complicado, porque exige observar objetos unas cien veces más débiles que los que estamos acostumbrados a estudiar a esas distancias.

Gracias a la resolución del Gran Telescopio Canarias se obtuvieron por primera vez datos espectroscópicos de cuásares distantes y poco luminosos con la calidad necesaria para poder determinar sus parámetros esenciales, como su composición química, la masa del agujero negro central o el ritmo al que este va absorbiendo materia. Y confirmaron que, en efecto, además de los cuásares muy energéticos y de evolución rápida, existe una población de desarrollo lento.

# Grandes muestreos de galaxias

El Observatorio de Calar Alto ha permitido concluir dos impresionantes muestreos de galaxias. Por un lado ALHAMBRA ha identificado, clasificado y calculado la distancia de más de medio millón de galaxias repartidas en ocho regiones del cielo. Por otro, CALIFA permite trazar la evolución de las galaxias con una precisión y detalle nunca antes alcanzados

2013

## ALHAMBRA: diez mil millones de años de evolución cósmica al alcance de la mano

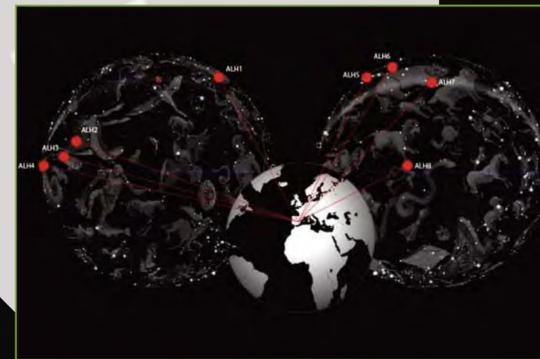
Tras siete años de precisas observaciones del universo desde el Observatorio de Calar Alto, y gracias a una técnica que descompone la energía de las estrellas en sus colores mediante filtros astronómicos, ALHAMBRA ha sido capaz no solo de identificar y clasificar más de medio millón de galaxias, sino también de calcular las distancias a las que se encuentran de nosotros con una precisión asombrosa. Como resultado, el sondeo ALHAMBRA, gestado en el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) ha permitido reconstruir la que, a día de hoy, representa la visión tridimensional más realista del universo. En la actualidad, los astrónomos disponen

de sondeos de gran área y poca profundidad o de muestras muy profundas del cielo pero que solo contemplan una única y reducida región, lo que no tiene en cuenta lo que se conoce como varianza cósmica, derivada del hecho de que el universo presenta regiones más y menos densas de galaxias. La gran fortaleza de ALHAMBRA reside en el estudio en detalle de ocho regiones profundas del cielo, lo que aporta una muestra representativa y asegura que cualquier conclusión que se extraiga de ella puede aplicarse a todo el universo. La visión del universo que aporta ALHAMBRA permite, por una parte, estudiar cómo ha cambiado el contenido estelar de las ga-

laxias a lo largo del tiempo, es decir, saber cómo, cuándo y cuánto han envejecido. Establecer una relación inequívoca entre la morfología, el contenido en estrellas y la edad de las galaxias nos permitirá comprender finalmente cuáles son los procesos físicos que gobiernan el universo a esas escalas. ALHAMBRA posibilita también abordar cómo se distribuyen las galaxias en el universo e incluso estudiar la nuestra, la Vía Láctea.

El proyecto ALHAMBRA, cuyo nombre responde a las siglas en inglés *Advanced Large, Homogeneous Area Medium Band Redshift Astronomical survey*, dispone de un sistema de veinte filtros que cubren todas las longi-

tudes de onda del óptico y de tres filtros en el infrarrojo, lo que permite determinar con gran precisión la energía emitida por las galaxias y la distancia de medio millón de galaxias con una profundidad sin precedentes para el tamaño de la muestra.



2014

## CALIFA: una visión sin precedentes de seiscientas galaxias del universo local

Las galaxias son grandes agrupaciones de estrellas, gas y polvo. Sabemos que crecen convirtiendo el gas en sucesivas generaciones de estrellas, y también que las más grandes alcanzaron su tamaño mediante la fusión de otras menores.

Pero, ¿cómo averiguar, a partir de la imagen de una galaxia, cómo se formó, o cómo ha evolucionado a lo largo de miles de millones de años? Más aún: ¿cómo desentrañar la historia de las galaxias y comprender su diversidad? Para responder a estas cuestiones, en lugar de estudiar objetos individuales se emplean muestreos, que analizan una muestra representativa de toda una población.

Generalmente, los muestreos emplean dos técnicas. La fotometría, que aporta gran resolución espacial pero información poco detallada sobre las características físicas de las galaxias. O la espectroscopía, que permite conocer las propiedades de las galaxias pero sin aco-

tar esos rasgos a regiones específicas. CALIFA conjuga ambas: obtiene más de mil espectros por cada una de las seiscientas galaxias de la muestra y permite generar mapas con distintas propiedades de las galaxias como la velocidad, la edad de sus estrellas o el movimiento del gas.

Además, permite recuperar su historia: cada fragmento de una galaxia puede verse como la suma de una población de estrellas con distinta edad, masa y composición química. Y toda esa información se halla codificada en su espectro. De modo que, si tenemos espectros que indican al detalle las propiedades de cada región de una galaxia y una base de datos que contemple todas las posibles evoluciones de las estrellas, solo hay que comparar el espectro obtenido con todos los posibles y ver qué posibilidad se adapta mejor a lo que vemos.

Este proceso, que se realiza mediante supercomputación, permite rebobinar la evolución de la galaxia y averiguar cuánta masa

se transformó en estrellas en cada momento y de qué tipo de poblaciones estelares se trataba. Y esto es, precisamente, lo que hace CALIFA.

Así, gracias a CALIFA obtenemos tres "visiones" galácticas. Por un lado, podemos conocer las galaxias con un nivel de detalle hasta ahora inconcebible. Además, CALIFA aporta datos sobre la evolución de cada galaxia en el tiempo. Nos indica cuándo y cuánto gas se convirtió en estrellas en cada etapa, y también revela la evolución de la galaxia en cada una de sus regiones a lo largo de diez mil millones de años. Finalmente, nos permite extraer la historia de la evolución en masa, brillo y elementos químicos de todas ellas. Así se ha podido comprobar que las galaxias más masivas crecen más rápido que las menores, y que además lo hacen de dentro afuera, formando las regiones centrales en primer lugar. También se han obtenido resultados sobre cómo se producen, dentro de las galaxias, los ele-

mentos químicos necesarios para la vida, o sobre los fenómenos involucrados en las colisiones galácticas. Incluso hemos sido capaces de observar directamente la última generación de estrellas que se ha formado y que aún se halla dentro de sus nidos de formación.



# Donde nacen los planetas

Investigar los discos protoplanetarios resulta complicado porque requiere mucha resolución angular y porque se trata de objetos muy fríos y débiles. Resumimos aquí el hallazgo de un disco observado justo en la etapa de transición entre el disco original y el sistema planetario y el de sendos discos protoplanetarios en torno a una estrella binaria

Los planetas se forman a partir de discos de gas y polvo que giran en torno a las estrellas jóvenes. Una vez formada la "semilla" del planeta, una pequeña acumulación de polvo, este irá agregando material y producirá un surco en el disco con la forma de su órbita. Esta etapa de transición entre el disco original y el sistema planetario -difícil de estudiar y aún poco conocida- es, precisamente, lo que se observó en 2014 en la estrella HD169142 y que se difundió a través de dos artículos.

"Aunque en los últimos años se han descubierto más de mil setecientos planetas extrasolares, solo en contados casos se ha obtenido imagen directa y todavía no se ha logrado una imagen inequívoca de un planeta en formación -apunta Mayra Osorio, investigadora del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que encabezaba una de las publicaciones-. En HD 169142 quizás estamos viendo, precisamente, las semillas de gas y polvo que más tarde se convertirán en planetas".

HD169142 es una estrella joven, con dos veces más masa que el Sol y cuyo disco se extiende unas doscientas cincuenta unidades astronómicas, o UA (una unidad que equivale a la distancia entre la Tierra y el Sol, ciento cincuenta millones de kilómetros). El sistema presenta una orientación inmejorable para el estudio de los planetas en formación ya que vemos su disco de frente.

El primero de los trabajos explora el disco de HD169142 con el radiotelescopio *Very Large Array*, que permite detectar granos de polvo de varios centímetros. Los resultados, combinados con datos del infrarrojo, que trazan la presencia de granos de polvo microscópicos, muestran dos surcos en el disco, uno en la región interna (entre 0,7 y 20 UA) y otro más externo y menos



desarrollado, entre 30 y 70 UA.

"Esta estructura ya sugería que el disco está siendo modificado por dos planetas u objetos subestelares, pero además los datos en radio desvelaron la existencia de un grumo de material en el surco externo, situado aproximadamente a la distancia de la órbita de Neptuno, que apunta a la existencia de un planeta en formación",

señala Mayra Osorio (IAA-CSIC).

## Uno (o dos) compañeros en torno a HD169142

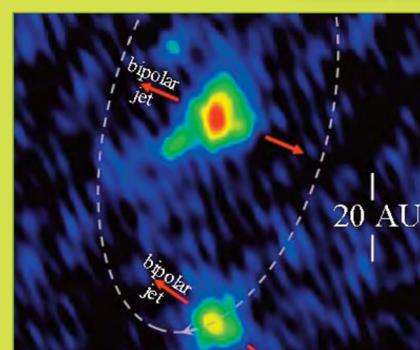
El segundo de los trabajos se centró en buscar, mediante observaciones en el infrarrojo con el *Very Large Telescope*, la existencia de algún objeto en los surcos del disco. Y hallaron una señal intensa en la cavidad interna, que podría corresponder a un planeta en formación o a una enana marrón (una especie de estrella "fallida", que no alcanzó la masa necesaria para desencadenar las reacciones nucleares que caracterizan a las estrellas).

Los datos en el infrarrojo no mostraron, sin embargo, la presencia del objeto en el surco externo que sugerían las observaciones en radio. Esta no detección podría deberse a limitaciones técnicas y ha servido para acotar las características de un posible objeto: los investigadores calculan que un objeto con una masa entre una décima y dieciocho veces la masa de Júpiter rodeado de una envoltura fría podría haber pasado desapercibido en la longitud de onda observada.

"En futuras observaciones podremos comprobar si el disco alberga uno o dos objetos. En cualquier caso, HD 169142 constituye un objeto prometedor porque se trata de uno de los pocos discos de transición conocidos y nos está descubriendo el entorno en el que se forman los planetas", concluye Osorio (IAA-CSIC).

1998

## Discos en estrellas binarias



L1551. Fuente: Lim & Takakuwa, NRAO/AUI/NSF.

El escenario de formación de planetas planteaba incógnitas en el caso de los sistemas múltiples, donde dos o más estrellas giran en torno a un centro de masas común (de hecho, las estrellas solitarias, como el Sol, son minoría). ¿Afecta la existencia de una estrella compañera a la estructura del disco, o a la formación de los planetas?

En 1998, un estudio en el que participaba el IAA halló que el objeto conocido como L1551 no era una única estrella joven, sino un sistema de dos estrellas muy próximas, con una distancia entre ellas similar a la que separa a Plutón del Sol. Y cada una de ellas presentaba un disco a su alrededor parecido a los que se habían observado en estrellas solitarias, solo que unas diez veces menor (una característica quizá impuesta por el efecto gravitatorio de la estrella compañera). Ambos discos contenían en torno a 0,05 masas solares, suficiente como para formar un sistema planetario.

Este hallazgo supuso la confirmación de que los discos protoplanetarios pueden existir en sistemas estelares binarios.

### Referencias:

L. F. Rodríguez et al. *Compact protoplanetary disks around the stars of a young binary system*. *Nature*. DOI:10.1038/26421

M. Osorio et al. *Imaging the Inner and Outer Gaps of the Pre-Transitional Disk of HD 169142 at 7 mm*. *The Astrophysical Journal* ApJ 791 L36. DOI: 10.1088/2041-8205/791/2/L36

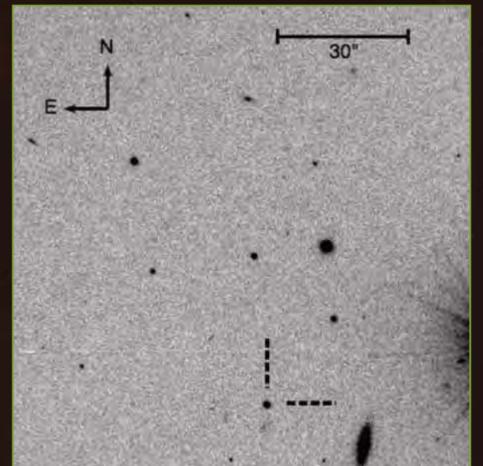
M. Reggiani et al. *Discovery of a companion candidate in the HD169142 transition disk and the possibility of multiple planet formation*. *The Astrophysical Journal*. 792, L23, DOI: 10.1088/2041-8205/792/1/L23

# La firma del nacimiento de un agujero negro en una explosión estelar

Aunque se conocía que estos fenómenos eran precursores del nacimiento de los agujeros negros, hasta ahora no se había detectado polarización circular en su luz, la firma inequívoca de su formación



Debajo: imagen de GRB121024A -señalado con líneas discontinuas-. El destello corresponde a la explosión de una estrella hace unos once mil millones de años, cuando la edad del universo era solamente un tercio del actual. Fondo: Reproducción artística de GRB121024A, donde se observan los chorros emergiendo de la estrella moribunda, en el centro de la que se formaría un agujero negro. La onda azul que se propaga por el chorro representa la polarización circular detectada. Fuente: NASA, Goddard Space Flight Center/ S. Wiessinger.



Hace unos once mil millones de años, una estrella con más de cien veces la masa del Sol agotó su combustible y se derrumbó sobre sí misma, proceso que produjo una explosión de rayos gamma -o un GRB, su acrónimo en inglés-, uno de los eventos más energéticos del universo. Su estudio, publicado en la revista *Nature*, permitió detectar por primera vez la firma inequívoca de la formación de un agujero negro. Esa firma consiste en una vibración específica de la luz conocida como polarización circular. “La luz que recibimos del universo es el resultado de la superposición desordenada de muchas ondas electromagnéticas que vibran aleatoriamente, es decir, luz no polarizada -ilustraba Javier Gorosabel, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC/UPV-EHU) que participó en el hallazgo-. Bajo algunas circunstancias, la luz de algunos astros vibra preferentemente en un plano, dando lugar a luz polarizada linealmente. Pero en este GRB hemos ha-

llado luz que viaja como si fuera un sacacorchos, es decir, polarizada circularmente”.

Y este tipo de polarización remite a los instantes posteriores al nacimiento de un agujero negro. Las estrellas que producen GRBs, además de muy masivas, giran muy rápidamente sobre sí mismas, lo que genera peculiaridades: su implosión no se produce de forma radial, como un globo al deshincharse, sino que sigue una forma espiral similar a la que dibuja el agua en un sumidero. Además, su luz se emite a través de dos chorros alineados con el eje de rotación que presentaba la estrella moribunda.

Pero, más importante aún, estas estrellas presentan un campo magnético muy intenso. Y, durante el derrumbe, el campo magnético también se arremolina en torno al eje de rotación de la estrella, reforzándose. “Podríamos decir que durante el desplome de la estrella se produce un potente géiser magnético que

surge del motor central, o el entorno del agujero negro, y cuyos efectos se sienten a distancias de billones de kilómetros”, apuntaba Gorosabel (IAA-CSIC/UPV-EHU). Todo este complejo escenario predice una ineludible firma: producto de este géiser magnético, la luz óptica emitida a través de los chorros debe estar polarizada circularmente. Y esto es, precisamente, lo que han hallado los autores en GRB121014A gracias a la precisión del Very Large Telescope (ESO) en Chile. “Posiblemente lo que hemos detectado son los efectos que el nacimiento de un agujero negro provoca en su entorno”, resumía el investigador.

## GRBs: de incógnita a fuente de información

Las explosiones de rayos gamma son destellos breves e intensos de radiación gamma que se producen al azar en cualquier lugar del cielo y que se relacionan con procesos ligados a sucesos catastró-

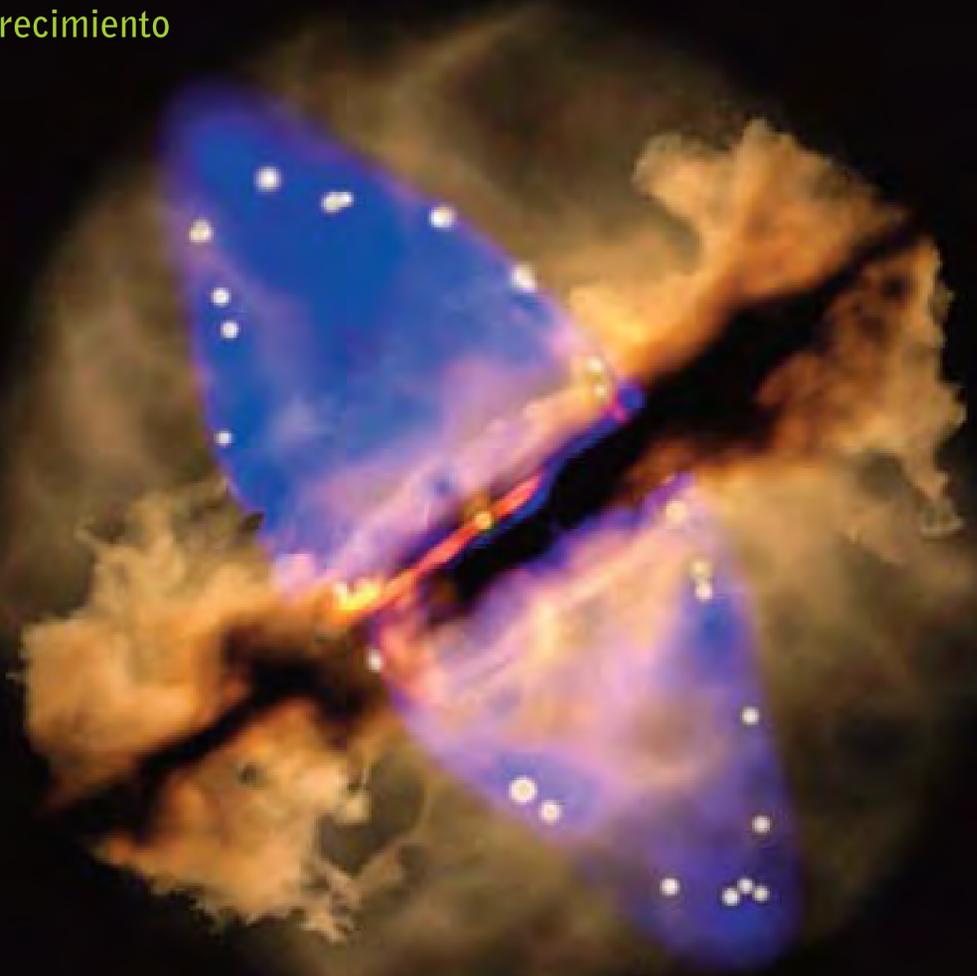
ficos en las estrellas. Se clasifican, según su duración, en GRBs cortos (pocos milisegundos) y largos (hasta media hora), generados por la fusión de dos objetos compactos y el colapso de una estrella muy masiva respectivamente.

La atmósfera de la Tierra es opaca a los rayos gamma, de modo que los GRB solo se pueden captar gracias a detectores embarcados en aparatos espaciales, como el satélite Swift de la NASA, responsable de la detección de GRB121014A.

Descubiertos en 1967, los GRBs constituyeron un enigma hasta que 1997 se confirmó que procedían de galaxias muy distantes, lo que implicaba que eran los objetos más energéticos del universo. Apenas dos décadas después, los GRBs largos -los más conocidos- se están revelando como una potente herramienta para conocer las circunstancias en las que se forman los agujeros negros y sus efectos sobre el entorno.

# La gestación de un jet estelar en tiempo real

La observación, a lo largo de dieciocho años, de una estrella masiva en formación muestra el inicio de la expulsión de materia a través de un jet bipolar, que regula su crecimiento



2001

## Una burbuja simétrica

En el espacio existen moléculas tan familiares como el agua, el amoníaco o el alcohol etílico. Estas moléculas funcionan como pequeñas emisoras de ondas de radio: de la misma forma que sintonizamos una emisora determinada con un aparato de radio, los radioastrónomos, dependiendo del aspecto concreto que pretendan estudiar, sintonizan con una cierta molécula. La molécula de agua es especialmente interesante, porque puede emitir con gran potencia, en lo que se llama emisión máser, que es como un láser (pero en ondas de radio en lugar de luz visible).

En 2001, un grupo de astrónomos, con participación del IAA, observaba la región de Cefeo A con el *Very Long Baseline Array* (VLBA) para confirmar la presencia de un disco protoplanetario en torno a la estrella en formación HW2. Y observaron, en las proximidades, algo inesperado: una estructura en forma de arco compuesta por máseres de agua individuales con una asombrosa simetría (se ajustaba a un arco de circunferencia casi perfecto, con un error de un 0.1%). Se calculó que el radio de la circunferencia medía 62 veces la distancia entre la Tierra y el Sol, pero en su centro no se conocía previamente ninguna estrella. Todo parecía apuntar a que una estrella joven hubiera expulsando una burbuja esférica de material, y que el choque contra la nube molecular producía la emisión máser. Estudiando datos de archivo del VLA, se localizó una débil emisión de una estrella en el centro del círculo. Teniendo en cuenta el tamaño y velocidad de expansión (unos diez kilómetros por segundo) del momento, concluyeron que la burbuja tendría unos treinta y tres años.

Se sabía que las estrellas en formación expulsan materia a velocidades supersónicas, pero las teorías y observaciones de formación estelar indicaban que la pérdida de material se producía a través de chorros bipolares. Por tanto, una eyección esférica supuso todo un reto para las teorías sobre la formación estelar.

Las estrellas se forman en el interior de grandes nubes de gas y polvo, a partir de fragmentos algo más densos que comienzan a colapsar bajo su propia gravedad. En torno al embrión estelar se forma un disco, del que la estrella incorpora nuevo material, mientras se desarrolla un chorro bipolar que expulsa materia y energía.

El fenómeno de la expulsión colimada de materia -los jets- se produce en objetos astronómicos muy diversos, como estrellas jóvenes, agujeros negros en núcleos de galaxias o estrellas en las últimas etapas de su vida. Sin embargo, aún se desconoce cómo se inician y qué factores determinan su grado de colimación. Un grupo internacional de astrónomos observó el momento en el que la estrella W75N(B)-VLA2 comienza a desarrollar estos jets, que son fundamentales en el

proceso de formación estelar. Los resultados se publicaron en la revista *Science*.

### Seguimiento "en vivo" de la evolución de una protoestrella

El estudio mostraba cómo W75N(B)-VLA2, una estrella masiva en formación, ha cambiado drásticamente el modo en que expulsa materia, pasando de hacerlo de forma prácticamente esférica a adoptar una forma alargada, con la eyección concentrada a lo largo de una sola dirección. Aunque el proceso de formación estelar dura centenares de miles de años, en este caso los investigadores han sido testigos de cómo, en apenas dieciocho años, entre 1996 y 2014, se producía la evolución hacia la formación de un jet.

"Las teorías actuales predicen que las estrellas jóvenes deben expulsar mate-

ria en forma de chorros colimados. Sin embargo, en estudios anteriores habíamos visto que algunas estrellas masivas muy jóvenes pasan por episodios breves en los que expulsan materia en todas direcciones. Sospechábamos que en algún momento debería producirse la transición hacia la fase de alta colimación. Esta transición es justamente lo que estamos presenciando en W75N(B)-VLA2", comenta Guillem Anglada, investigador del IAA-CSIC que participó en el estudio. Los datos obtenidos son consistentes también con la existencia de un disco en torno a la protoestrella, lo que completa el escenario de formación estelar descrito en los modelos.

Este trabajo abre una puerta para estudiar cómo evolucionarán en los próximos años los ingredientes básicos de la formación estelar.

Gestación de un jet en una protoestrella de gran masa. Simulación hidrodinámica tridimensional y visualización, generada con el código Shape, de una eyección episódica breve en la protoestrella masiva W75N(B)-VLA 2. La eyección inicial en múltiples direcciones (panel izquierdo) se transforma en una eyección colimada (panel derecho) a medida que se expande en un medio con una distribución toroidal de gas y polvo. (Crédito de la imagen: Wolfgang Steffen, Instituto de Astronomía, UNAM).