

# I NFORMACIÓN Y A CTUALIDAD A STRONÓMICA

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

FEBRERO DE 2016, NÚMERO 48

## Rayos en el Sistema Solar

Núcleos activos de galaxias

Proyecto CARMENES

INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA  
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

<http://www.iaa.es>

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

Se permite la reproducción de cualquier texto o imagen contenidos en este ejemplar citando como fuente "IAA: Información y Actualidad Astronómica" y al autor o autores.

Instituto de Astrofísica de Andalucía  
c/ Camino Bajo de Huétor 50, 18008 Granada. Tlf: 958121311 Fax: 958814530. e-mail: revista@iaa.es

Depósito legal: GR-605/2000  
ISSN: 1576-5598

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

# SUMARIO

## REPORTAJES

Rayos en el Sistema Solar...3

Núcleos activos de galaxias: alimentando al monstruo ...7

EL "MOBY DICK" DE... Carolina Kehrig (IAA)...11

DECONSTRUCCIÓN Y otros ENSAYOS. El proyecto CARMENES ...12

CIENCIA EN HISTORIAS...Cien años de agujeros negros... 14

ACTUALIDAD ...16

SALA LIMPIA ...21

CIENCIA: PILARES E INCERTIDUMBRES. El origen del universo...22

## ¡ESTRENAMOS WEB!

Gracias a una subvención concedida por la Sociedad Española de Astronomía (SEA), hemos desarrollado una nueva web adaptada a dispositivos móviles.  
¡Gracias, SEA!

[revista.iaa.es/](http://revista.iaa.es/)



### La imagen de OSIRIS

Desde diciembre el 2015 el equipo de OSIRIS, la cámara a bordo de la misión Rosetta (ESA), está haciendo públicas las imágenes del cometa 67P, ya de vuelta hacia las regiones externas del Sistema Solar.

Fuente: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team  
MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA

Todas las imágenes en:

[https://planetgate.mps.mpg.de/Image\\_of\\_the\\_Day/public/](https://planetgate.mps.mpg.de/Image_of_the_Day/public/)



# Rayos en el Sistema Solar

## LA ACTIVIDAD ELÉCTRICA INFLUYE EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ATMÓSFERAS Y, POR LO TANTO, EN EL CLIMA. EXISTEN VARIAS INICIATIVAS PARA ESTUDIARLA

Por F. J. Pérez Invernón, M. Passas, A. Luque y F. J. Gordillo-Vázquez (IAA-CSIC)

### DESDE HACE SIGLOS, LOS SERES HUMANOS ESTAMOS ACOSTUMBRADOS A CONVIVIR CON LOS DESTELLOS Y LOS SONOROS TRUENOS PRODUCIDOS POR LOS RAYOS.

Sin embargo, hasta el siglo XVIII no comenzamos a adentrarnos en la compleja física de estas descargas eléctricas atmosféricas, cuyo conocimiento es fundamental para entender el circuito eléctrico global de la Tierra así como la química de ciertas especies ( $\text{NO}_x$ , que incluye óxido y dióxido de nitrógeno) en la atmósfera terrestre.

Podríamos decir que el estudio científico de los rayos comenzó en torno a la década de 1750, a partir de rudimentarios experimentos diseñados por Benjamin Franklin, quien estableció la naturaleza eléctrica de los rayos a partir de su semejanza con las descargas creadas en laboratorio. Los avances técnicos acumulados desde entonces permiten hoy el uso de modernos satélites que observan y cuantifican estos fenómenos.

Hoy sabemos que existen diferentes tipos de rayos en la Tierra, que se diferencian según a qué altura se producen, la longitud de su canal, la energía que transmiten, la impulsividad e incluso la polaridad, y sabemos que sus efectos en la atmósfera son diferentes. Los rayos mejor conocidos son los poderosos (por su enorme estruendo) rayos nube-suelo, o CG (según sus siglas en inglés *Cloud-to-ground*), pero estos no son los más comunes, sino los rayos entre-nubes y los nube-nube, o IC y CC (según sus siglas en inglés *Intra-Cloud* y *Cloud-to-Cloud*).

Dentro de esta categoría podríamos colocar otro subtipo, las cortas pero muy impulsivas descargas compactas entre-nubes, o CID (según sus siglas en inglés *Compact-Intracloud-Discharges*), poco estudiadas aún y muy complejas, ya que parecen estar muy ligadas a la formación de los otros tipos de rayos y pueden ser incluso la causa de algunas emisiones muy energéticas de rayos gamma terrestres asociados a nubes de tormentas eléctricas muy intensas.

Una de las razones prácticas para profundizar en el estudio de los rayos es su influencia en la composición química de la atmósfera y, por ende, en el clima. Cerca de los trópicos los rayos son más numerosos por la mayor insolación, y en estas regiones se crean cantidades importantes de  $\text{NO}_x$ , elemento clave en la química del ozono y en la relación entre la atmósfera y la biosfera.

En nuestro grupo de investigación desarrollamos nuevos modelos químicos y electrodinámicos de la formación y evolución de los rayos y las enormes descargas eléctricas mesosféricas asociadas a ellos, así como de sus efectos químicos y eléctricos en la troposfera y mesosfera de la Tierra. Además, desarrollamos novedosos instrumentos científicos para analizar las características espectrales y polarimétricas de la luz emitida por las descargas eléctricas naturales y poder comparar con nuestros modelos.

Pero la actividad eléctrica atmosférica no es un fenómeno exclusivamente terrestre: existe también en otros planetas del Sistema

Solar, como en los gigantes gaseosos y también de una forma peculiar en Marte. Además, existen indicios de actividad eléctrica en la atmósfera de Venus e incluso podemos especular con la presencia de fenómenos eléctricos en exoplanetas de otros sistemas estelares.

Estudiar esto es fundamental, ya que existen teorías que ligan la actividad eléctrica terrestre con la formación de las moléculas complejas que dieron origen a la vida.

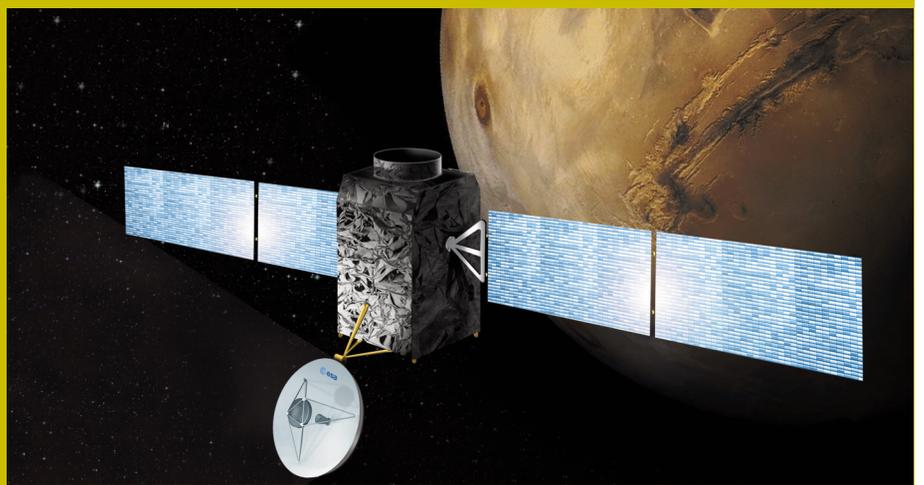
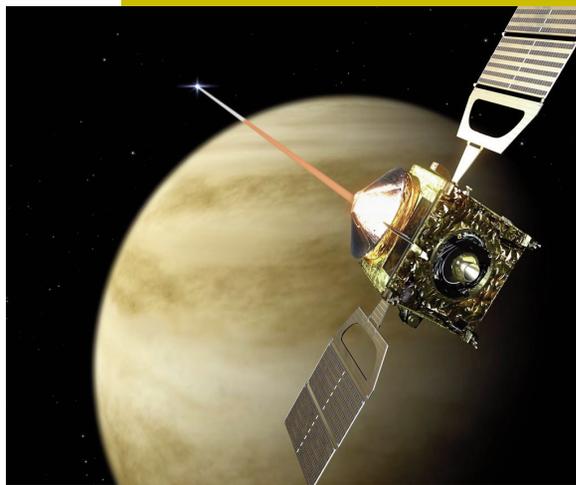
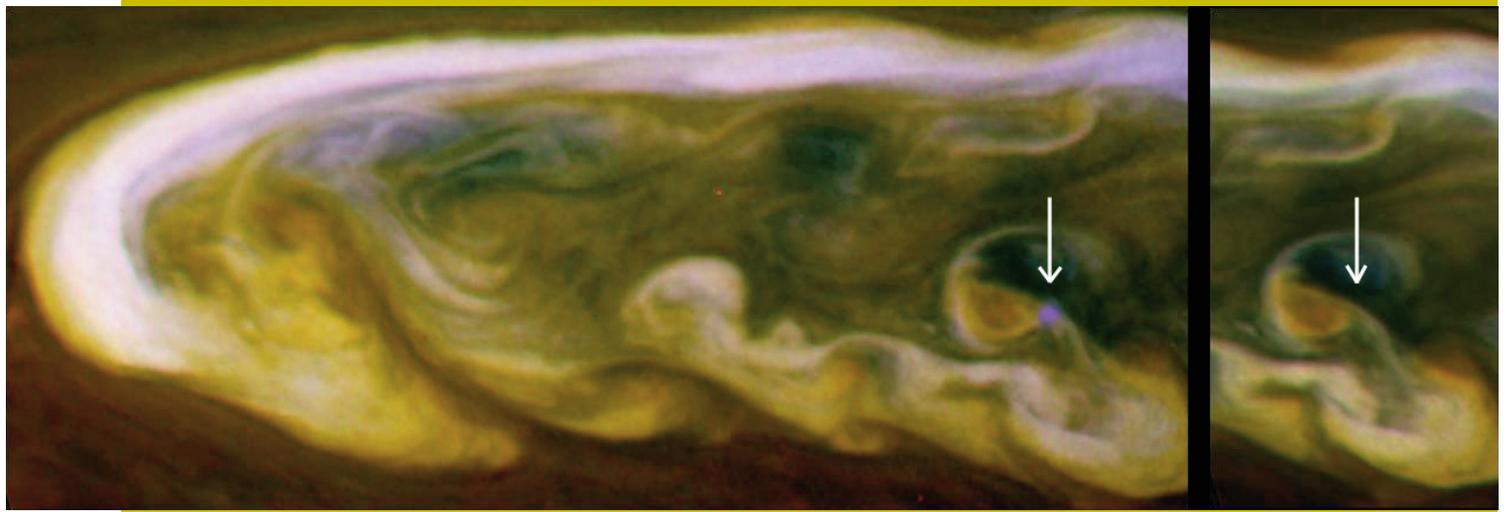
### Descargas eléctricas en la alta atmósfera de la Tierra

En el año 1989 se descubrieron, por acci-



Ejemplos de distintos tipos de rayos: nube-nube (André Karwath, dcha) y nube-suelo (Alan Liu, debajo).





Arriba, imagen en falso color de rayos en la atmósfera de Saturno tomada por la misión Cassini (NASA). Debajo, concepciones artísticas de las misiones Akatsuki (JAXA) y ExoMars (ESA), con destino a Venus y Marte respectivamente.

dente, unas misteriosas emisiones ópticas transitorias muy rápidas producidas en la mesosfera justo encima de una gran tormenta. Estas observaciones iniciaron una nueva línea de investigación estrechamente asociada a los rayos. Ya en el año 1925 el físico escocés C. T. R. Wilson predijo emisiones como estas, pero no fue hasta su descubrimiento y posterior estudio cuando se establecieron sus características y mecanismos de producción. Después de más de dos décadas de observaciones, desarrollo de modelos, validaciones y descartes de teorías, hoy se han establecido algunas de las características, impacto químico y diferentes tipos de estos fenómenos, llamados genéricamente TLEs (del inglés *Transient Luminous Events*), pero estamos aún relativamente lejos de conocer todas sus causas y consecuencias.

Los TLEs son causados por los grandes campos eléctricos que se forman sobre las nubes de una tormenta eléctrica. Algunos, como los chorros azules o los chorros azules gigantes, son descargas eléctricas que ascienden desde la troposfera a la ionosfera. Otros, como los *sprites*, halos y *ELVEs*, se producen en alturas entre cincuenta y cien kilómetros, donde la baja densidad de la atmósfera permite que los campos eléctricos aceleren fácilmente electrones que ionizan y

excitan moléculas del aire. Al desexcitarse, estas moléculas emiten luz durante tiempos cercanos a los milisegundos.

Actualmente solo se conocen algunas de sus implicaciones químicas más directas en la atmósfera terrestre, pero estos fenómenos pueden jugar un papel clave en la dinámica de gases tan importantes para la vida como el ozono. Tampoco está completamente establecida su relación con los diferentes tipos de rayos, ya que existe poca información observacional que ligue los TLEs con los rayos entre nubes. Por ello, en nuestro grupo desarrollamos modelos electrodinámicos y químicos que pretenden profundizar en los mecanismos electrodinámicos fundamentales implicados en la formación y propagación de rayos y TLEs, así como en la química ligada a los rayos en la troposfera y a los halos, *sprites* y *ELVEs* en la mesosfera. Estos modelos relacionan las propiedades de los TLEs con algunas características de los rayos que los producen, tales como su inclinación, energía o carga transferida.

Un ejemplo son los halos: descargas difusas que emiten luz en forma de disco, pudiendo abarcar hasta centenares de kilómetros de diámetro. Los halos se producen como consecuencia del campo eléctrico cuasi-estático que acelera a los electrones, los cuales provocan cambios químicos en la mesosfera.

En la literatura está bien establecida la producción de halos por rayos nube-suelo, que son los de más fácil detección, pero aún son difíciles de relacionar con otros tipos de rayos, como los entre-nubes, por lo que en nuestro grupo desarrollamos modelos de halos producidos por rayos de diferentes características.

Otro fenómeno ligado al campo eléctrico cuasi-estático es el de los *sprites*, que son descargas ramificadas en lugar de difusas, donde a cada una de esas ramas se le denomina *streamer*. Existe una gran variedad de patrones en la propagación de los *streamers*: por ejemplo, se han tomado observaciones que parecen ligar cierto tipo de *sprites* llamados de columna con una cantidad pequeña de rayos, y a los de otro tipo, llamados zanahoria, de ramas más enrevesadas, con la sucesión de varios rayos. Además, aún no entendemos completamente la influencia de los halos producidos inmediatamente antes de los *sprites*.

Por último nos fijaremos en los *ELVEs*, consecuencia de la aceleración de electrones causada por el breve pulso del campo eléctrico de radiación emitido por un rayo. Estas emisiones suelen tener forma de rosquilla, con espacio vacío en el centro. En nuestro grupo desarrollamos modelos para predecir la forma de estos fenómenos según la incli-

nación del rayo, así como para investigar su posible origen en los diversos tipos de rayos, tales como las poco exploradas descargas compactas intra-nubes (CID).

**Rayos en otros planetas del Sistema Solar**  
Tal como hemos mencionado, la Tierra no es el único planeta del Sistema Solar en el que se producen fuertes descargas eléctricas. Muchos de sus vecinos albergan también estos fenómenos, aunque con características diferentes.

Es bien conocido que en los gigantes gaseosos (Saturno, Júpiter, Urano y Neptuno) se producen poderosas tormentas que abarcan miles de kilómetros. Es por ello que varias sondas, como las *Voyagers*, *Galileo*, *Cassini* y *New Horizons* buscaron y, de hecho, detectaron emisiones procedentes de descargas eléctricas en estos planetas. Además, en las tormentas de polvo de Marte también se producen descargas eléctricas por la fricción de granos de polvo (triboelectricidad), que pueden jugar un papel relevante en la formación de ciertas especies químicas en la superficie así como en la baja atmósfera marciana. Las medidas y caracterización del campo eléctrico en esas descargas eléctricas marcianas serán objeto de investigación por la misión *ExoMars* con dos fases de lanzamiento en 2016 y 2018.

Un caso especial y de gran interés en el estudio de actividad eléctrica en otros planetas es nuestro vecino Venus. Entre los principales resultados del programa de orbitadores y vehículos de descenso *Venera* (1961-1983) de la antigua Unión Soviética destaca la detección persistente de pulsos electromagnéticos e incluso algunos espectros ópticos procedentes de lo que parecen ser rayos en la atmósfera de Venus. Sin embargo, misiones posteriores como la *Pioneer Venus Orbiter* (PVO) y otras como *Cassini* o el programa de globos *Vega* (1984-1986), que sobrevolaron la atmósfera de Venus a cincuenta kilómetros de altura, no han logrado detectar señales ópticas claras (como en Júpiter y Saturno) que demuestren definitivamente la existencia de rayos en Venus. Según los resultados del programa *Venera*, los rayos en Venus estarían asociados a fuertes tormentas eléctricas localizadas en regiones muy concretas del planeta. Las tormentas en Venus, junto a los fuertes vientos allí reinantes, dan lugar a lluvia de ácido sulfúrico. Allí, la capa de nubes donde se forman cristales de este ácido se sitúa a una altura de entre aproximadamente cuarenta y cinco y sesenta y cinco kilómetros. Si los vientos verticales son suficientemente intensos, es posible la separación de cargas que



El instrumento GRASSP, desarrollado en el IAA para la detección y posterior caracterización de las emisiones de los diferentes tipos de descargas luminosas transitorias o TLEs.

puede dar lugar a la creación de rayos entre nubes.

En diciembre de 2015, la sonda *Akatsuki* de la agencia espacial japonesa (JAXA) se insertó con éxito en la órbita de Venus. Entre otros instrumentos, esta sonda va

*Se han detectado emisiones de descargas eléctricas en los gigantes gaseosos, así como en Marte y Venus*

equipada con la cámara LAC (acrónimo del inglés *Lightning and Airglow Camera*), especialmente diseñada para la detección óptica de rayos en Venus. Las primeras campañas observacionales con la cámara LAC tienen previsto comenzar a partir de abril de 2016. Es importante resaltar que, en caso de existir rayos en Venus, estos estarían producidos probablemente en la ancha capa de nubes venusiana y podrían tener características diferentes a los rayos terrestres, por lo que detectarlos desde el espacio puede ser difícil pero, al mismo tiempo, de extraordinario interés científico. Por otra parte, existen también medidas espectrográ-

*Los datos recogidos no permiten determinar si las emisiones son consecuencia de rayos o de TLEs; determinarlos permitiría inferir algunas propiedades relevantes de estas atmósferas*

ficas recientes (del año 2007) tomadas desde telescopios terrestres en las que se han detectado trazas de óxido de nitrógeno (NO) superiores a las esperadas en las capas bajas de la atmósfera venusiana, y puede que se

trate de una huella química de rayos.

**Posibles TLEs asociados a rayos en otros planetas**

Sin duda, el modelado y la observación de los TLEs pueden darnos información sobre las características de la atmósfera en las alturas donde estos se producen, por lo que detectarlos en otros planetas puede ayudarnos a entender estos otros mundos.

Según lo que hemos aprendido de la Tierra, es muy frecuente que se generen TLEs cuando existen tormentas, por lo que a priori parece bastante lógico pensar que estos fenómenos existan en la mayoría de los planetas donde se produzcan rayos.

Como hemos señalado, existen numerosas observaciones de descargas eléctricas en los gigantes gaseosos del Sistema Solar. Sin embargo, los datos recogidos hasta el momento no son suficientemente esclarecedores como para determinar si las emisiones que las naves han observado son consecuencia directa de rayos o de TLEs. Los modelos que desarrollamos actualmente pueden aclarar esta cuestión. Distinguir entre emisiones de rayos y TLEs es de suma importancia ya que nos permitiría, a partir de observaciones de descargas eléctricas, inferir algunas propiedades relevantes de las atmósferas de estos planetas.

Como en el apartado anterior, Venus es un caso especial puesto que la existencia de rayos en su atmósfera no está completamente demostrada. En nuestro grupo desarrollamos modelos para estudiar la influencia eléctrica y química en la alta atmósfera de Venus de hipotéticos rayos, así como para predecir algunas de las emisiones que podrían probar de forma concluyente la existencia de descargas eléctricas. Es posible que los rayos venusianos sean difíciles de observar directamente, pero seremos capaces de encontrar TLEs que los delaten si sabemos en qué longitudes de onda emiti-

rían estos fenómenos en una atmósfera como la de Venus.

### Radiaciones de alta energía sobre tormentas

Además de toda la casuística de los TLEs, los rayos terrestres producen otro tipo completamente diferente de fenómeno, los energéticos rayos gamma y rayos X terrestres, o TGF (del inglés *Terrestrial Gamma-ray Flashes*), emisiones detectadas también en los últimos años del siglo pasado y cuyo estudio es fundamental, entre otras cosas,

para cuantificar la radiación recibida por la tripulación de vuelos comerciales que pasan un tiempo considerable de su vida volando por encima de las tormentas.

Los mecanismos de producción de esta radiación de alta energía no son aún conocidos por completo, pero está establecido que provienen de electrones que han sido acelerados hasta energías relativistas. Los fotones que conforman un TGF se emiten cuando estos electrones colisionan con núcleos atómicos, en un proceso llamado *bremstrahlung* (del alemán "radiación de frenado").

Existen diversas teorías sobre cómo llegan los electrones a acelerarse a velocidades tan elevadas. Una hipótesis sugiere que se aceleran en las inmediaciones del canal de los rayos, donde los campos eléctricos locales son elevadísimos, mientras que otros modelos sitúan su origen en los campos eléctricos de gran escala existentes en el interior de las nubes de tormenta. Lo que está claro es que estos fotones tan energéticos son capaces de provocar reacciones fotonucleares en la atmósfera que puedan dar lugar a diferentes cadenas de otras reacciones químicas.

## FUTURAS MISIONES ESPACIALES PARA EL ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD ATMOSFÉRICA

Existen varios proyectos internacionales en marcha para la investigación de la actividad eléctrica atmosférica terrestre desde el espacio, ya que esta puede tener gran influencia en el clima planetario o, a escala más local, en la meteorología. Además, las emisiones ópticas producidas por las descargas eléctricas naturales proporcionan información importante sobre las capas de la atmósfera menos exploradas, como la mesosfera.

Nuestro grupo forma parte del equipo científico de tres misiones europeas: ASIM (*Atmosphere-Space Interactions Monitor*), TARANIS (*Tool for the Analysis of RAdiations from lightNings and Sprites*) y COBRAT (*Coupled Observations from Balloon Related to Asim and Taranis*). La misión ASIM, cuyo lanzamiento se prevé para 2017, está siendo desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA) y consistirá en el emplazamiento de instrumentación científica en el módulo europeo Columbus de la Estación Espacial Internacional con el fin de observar los TLEs y TGF en nuestro planeta. Para ello, el instrumento cuenta con distintos módulos compuestos por cámaras y sensores que orbitarán la Tierra escrutando las capas atmosféricas superiores a las tormentas y registrando fenómenos transitorios relacionados con la actividad eléctrica de nuestro planeta.

Por otra parte, la misión TARANIS tiene objetivos similares a ASIM y,



para ser llevada a cabo, la agencia espacial francesa (CNES) lanzará, en la segunda mitad de 2018, un satélite dotado de detectores especialmente diseñados para el estudio de la actividad eléctrica desde una altitud de setecientos kilómetros en órbita polar. La misión COBRAT pretende maximizar el retorno científico de ASIM y TARANIS mediante globos estratosféricos cuyas góndolas serán equipadas con instrumentación científica (hasta un máximo de ciento cincuenta kilogramos de peso). Los globos COBRAT están diseñados para sobrevolar regiones tormentosas durante más de una semana a una altura de entre veinte y cincuenta kilómetros. Los primeros globos de la misión COBRAT se lanzarán en 2019 o 2020.

Una misión importante para el estu-

dio de los rayos terrestres es LIS (*Lightning Imaging Sensor*), diseñada por la NASA y que ha proporcionado valiosa información desde que fue lanzada en el año 1997 a bordo del satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) de NASA. En 2013 se acordó el lanzamiento a comienzos de 2016 de un gemelo de LIS, que se acoplará a la Estación Espacial Internacional y contará con cámaras de cuatro kilómetros de resolución espacial que observarán los rayos de tormenta día y noche en coordinación con ASIM. La misión ISS-LIS será pues totalmente complementaria a ASIM, y brindará la oportunidad de observar simultáneamente los rayos de tormenta y los fenómenos transitorios y emisiones energéticas producidos en las capas superiores de la atmósfera.

Por otra parte, a finales de 2016 está previsto el lanzamiento del primero de una nueva serie de satélites geoestacionarios (órbitas a 36.000 kilómetros de altura) dedicado a la observación de rayos desde el espacio, conocido como GOES-R (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), diseñado por NASA y operado por NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Agency*). Uno de los principales objetivos reside en realizar observaciones de rayos de tormenta cada treinta segundos para obtener información que permita mejorar los modelos de predicción meteorológica y de tiempo severo.

Parecido objetivo tendrá un satélite de la serie Meteosat de Tercera Generación (MTG), diseñada por la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos, que en el año 2019 pondrá en órbita por primera vez un satélite geoestacionario equipado con sensores de rayos. Sin duda, las futuras misiones espaciales para la Tierra, Venus y Marte proporcionarán información que nos permitirá validar modelos y desarrollar otros nuevos, y aportarán información importante sobre la influencia de la electricidad atmosférica en las propiedades químicas y eléctricas de las atmósferas de los planetas interiores del Sistema Solar, lo que nos llevará a comprender mejor su historia y su clima.

# Galaxias activas: alimentando al monstruo

## CUESTIONES FUNDAMENTALES SOBRE LOS NÚCLEOS ACTIVOS DE GALAXIAS, UNOS DE LOS OBJETOS MÁS ENERGÉTICOS DEL UNIVERSO

Por Montserrat Villar (CAB)

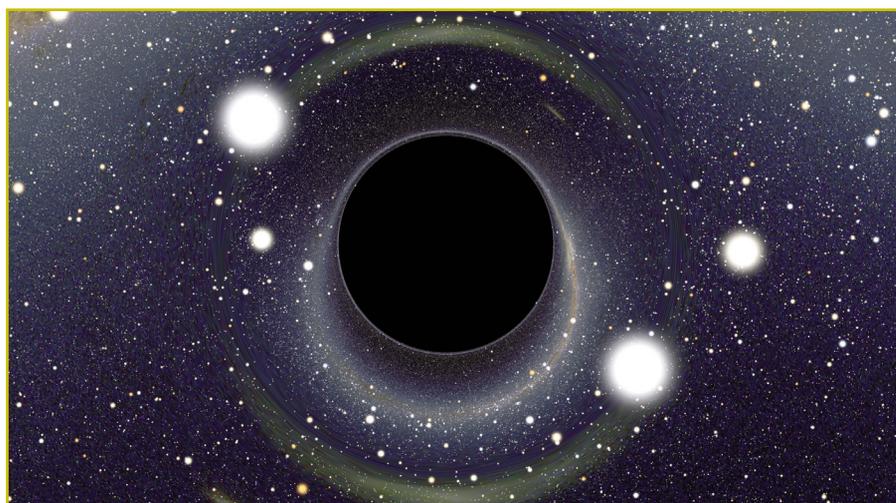
ÉRASE UNA VEZ... un dragón que dormitaba en el interior de una gruta, en pleno corazón del reino. Los habitantes del país vivían plácidamente y sin grandes avatares, salvo los propios de una existencia cotidiana. Todos sabían que allí moraba un temible monstruo. Sin embargo, residían despreocupados pues este pasaba los días escondido y tranquilo, sin molestar a nadie. Salvo a quienes entraban en la cueva: estos no regresaban jamás. La bestia entonces despertaba y las consecuencias eran devastadoras.

Vamos a hablar de monstruos en el corazón de las galaxias. Este artículo trata de galaxias activas: aquellas cuyo centro está ocupado por un enorme agujero negro, el dragón de nuestra historia, cuya presencia pasaría en general inadvertida, salvo que algún mecanismo lo active despertándolo de su letargo. ¿Qué ocurrirá entonces?

### En el corazón de la Vía Láctea

Viajemos al centro de nuestra galaxia, situado a unos 27.000 años luz. Si la Vía Láctea cupiera en un campo de fútbol, el Sistema Solar tendría un tamaño microscópico, algo mayor que el de una bacteria típica. Esto nos da una idea del larguísimo recorrido que tendremos que hacer.

La Tierra, de donde partimos, se halla en los "suburbios", en un brazo espiral de la Galaxia donde hay poca densidad de estrellas que, además, transitan tranquilas. Nos vamos a adentrar en el núcleo, la zona central más superpoblada. A medida que nos acercamos vemos cada vez más estrellas. Las más cercanas al centro describen órbitas elípticas a velocidades altísimas, de varios millones de kilómetros por hora.



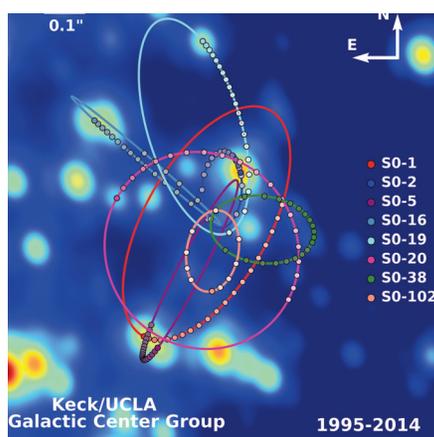
Si pudiéramos aproximarnos al agujero negro en el centro de nuestra galaxia veríamos algo similar a esta imagen generada por ordenador. El campo gravitatorio es tan intenso que la luz de estrellas cercanas se curva provocando distorsiones visuales. Dado que nada que atravesase el horizonte de sucesos puede escapar, ni siquiera la luz, el interior aparece completamente negro. Crédito: Alain Riazuelo.

Giran alrededor de un objeto oscuro de masa enorme, que está contenido en un volumen muy pequeño, menor que el del Sistema Solar. Solo que, en lugar de un sol, hay una cantidad de masa equivalente a cuatro millones de soles... ¡Y no vemos nada! Se trata de un agujero negro. Ningún objeto astronómico conocido puede contener tanta masa en un volumen tan pequeño.

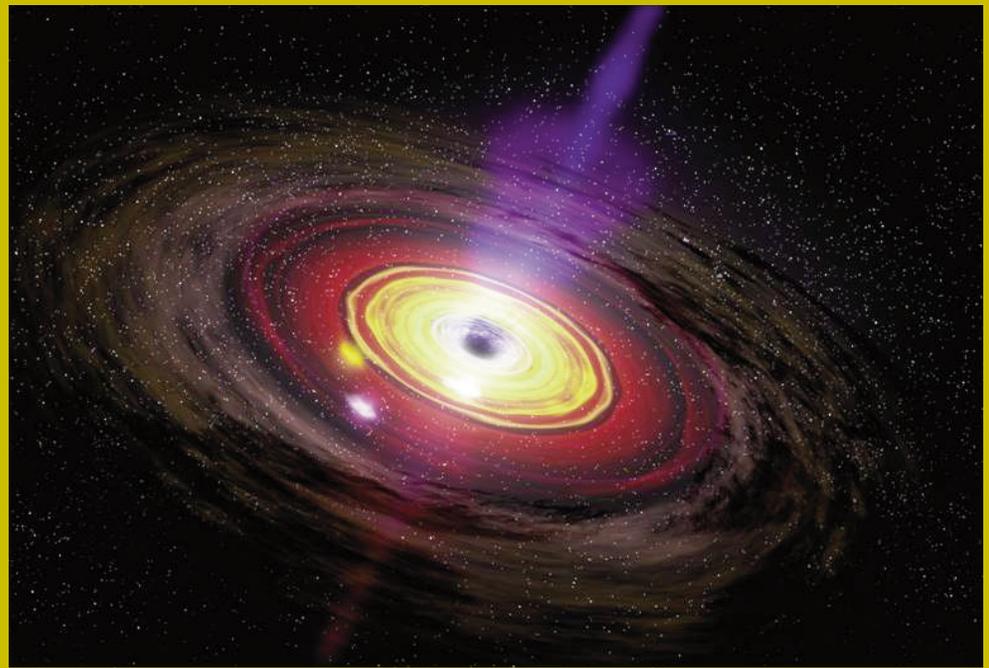
Seguimos acercándonos y vemos algo muy extraño, similar a una zona esférica totalmente negra (esta esfera negra es una pre-

dicción teórica, como se apunta en la imagen superior; el tamaño es tan pequeño que la tecnología no permite su observación directa). Tiene un radio cinco veces menor que la distancia entre Mercurio y el Sol. El borde de esa zona marca el horizonte de sucesos del agujero negro central. En el interior, la gravedad es tan intensa que nada puede escapar, ni siquiera la luz. Por eso es negro. Lo que atraviese el horizonte de sucesos no podrá regresar. Como los despidados de nuestra historia inicial que entran en la cueva del dragón para no volver jamás.

La existencia de un agujero negro en el centro de la Vía Láctea fue propuesta en 1971. Las pruebas concluyentes empezaron a acumularse hacia finales de la década de 1990. Durante unos quince años se rastrearon los movimientos de unas treinta estrellas, las más próximas conocidas a la localización esperada del agujero negro, región llamada Sagitario A\* (abreviado Sgr A\*). Se obtuvo así la visión más nítida conseguida hasta la fecha del centro de nuestra galaxia. La estrella más cercana a Sgr A\* tarda poco más de quince años en describir su órbita y



Órbitas de las estrellas conocidas más próximas a Sgr A\* rastreadas a lo largo de veinte años (Keck/UCLA/A.Ghez). S02 es la más cercana. Las propiedades de su órbita han dado lugar a la determinación más precisa hasta la fecha de la masa central responsable de las órbitas estelares: una masa equivalente a unos cuatro millones de soles en un volumen menor que el del Sistema Solar: un agujero negro.



Impresión artística de un disco de acreción alrededor de un agujero negro supermasivo. Crédito: NASA / Dana Berry, SkyWorks Digital.

Composición artística (aunque basada en imágenes reales) en la que se aprecia el tamaño aparente gigantesco de las estructuras de radio de una galaxia activa comparado con el de la Luna. Crédito: Ilana Feain, Tim Cornwell, Ron Ekers y Shaun Amy (CSIRO/ATNF), R. Morganti (ASTRON), N. Junkes (MPIfR).

se acerca a una distancia mínima de unas ciento veinte unidades astronómicas (UA), es decir, unas tres veces la distancia media entre el Sol y Plutón. Llega a alcanzar una velocidad de unos dieciocho millones de kilómetros por hora, ¡unos cinco mil kilómetros por segundo! Puesto que esta órbita está determinada por el campo gravitatorio generado por la masa central, esta puede deducirse de manera relativamente sencilla. La conclusión es que se necesita una masa equivalente a cuatro millones de soles (es decir, cuatro millones de masas solares) para explicar los movimientos de esa estrella. Esta masa gigantesca está concentrada en un volumen mucho menor que el del Sistema Solar. No tenemos una explicación alternativa: como decíamos más arriba, ha de ser un agujero negro.

#### Cuando el monstruo despierta de su letargo

Al igual que nuestra galaxia, muchas, probablemente todas las galaxias con una masa parecida o mayor contienen agujeros negros en sus centros. Los denominamos “supermasivos” porque sus masas pueden alcanzar desde unos pocos millones hasta miles de millones de masas solares. Habría que juntar todas las estrellas de una galaxia como la Gran Nube de Magallanes para reunir una masa equivalente a la de los agujeros negros de mayor masa. Como si el dragón de nuestra historia escondido en su pequeña gruta pesara tanto como miles de millones de personas.

En general, los agujeros negros supermasivos se hallan en estado latente, como el dra-

gón que dormita tranquilo sin molestar a nadie. Sin embargo, en un 10% de las galaxias el agujero negro presenta una actividad frenética. Se trata de las llamadas galaxias activas. Algo ha hecho que el monstruo despierte.

¿Cómo se manifiesta esa actividad en los centros galácticos? Las galaxias activas son lugares donde todo lo que sucede es superlativo: masas, energías, velocidades... todo es enorme y extremo. Nos recuerdan que el universo es un lugar muy violento. Para empezar, el núcleo o zona central emite cantidades enormes de luz. En las más potentes, los cuásares, esa región puede emitir tanta luz como mil galaxias similares a la nuestra. Si colocáramos el núcleo de un cuásar en el centro de la Vía Láctea, lo veríamos tan brillante como la Luna, aunque estaría casi un billón de veces más lejos. Esa fuente de luz está concentrada en un volumen relativamente diminuto similar al del Sistema Solar. No conocemos nada, salvo los agujeros negros supermasivos, que pueda generar tanta energía ocupando un volumen tan pequeño.

Existen otras manifestaciones muy llamativas de la actividad nuclear en galaxias, como los chorros (o *jets*) relativistas. Se trata de “cócteles” de partículas muy energéticas que escapan de las regiones cercanas al agujero negro (aunque siempre exteriores al horizonte de sucesos), de donde son expulsadas a velocidades de decenas de miles de kilómetros por segundo (próximas a la velocidad de la luz, por eso se llaman relativistas) y alcanzan distancias que a menudo superan el tamaño de las galaxias.

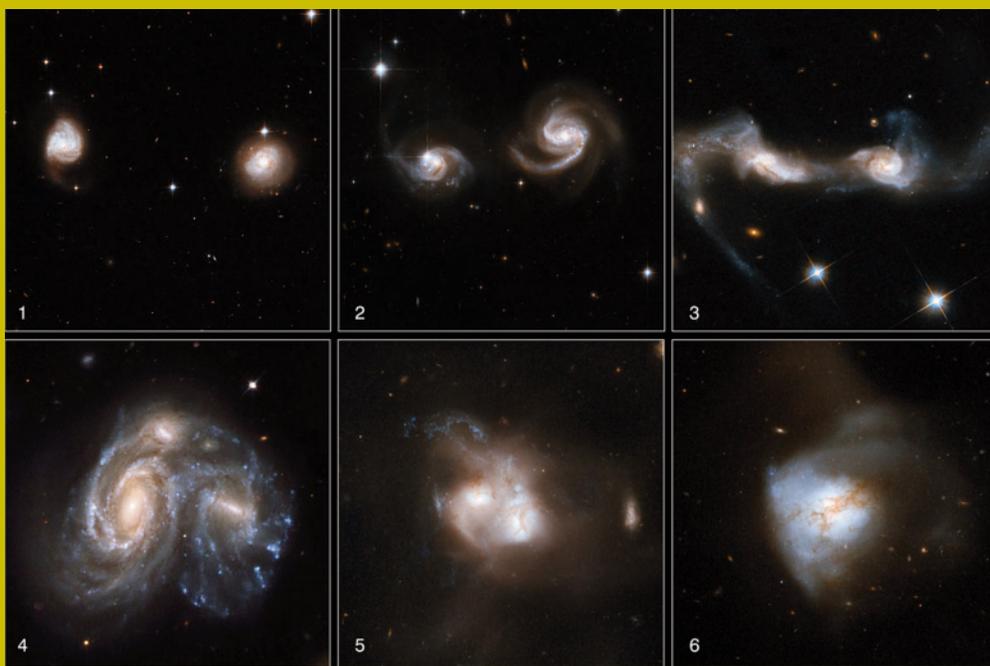
Pueden recorrer millones de años luz y abandonar la galaxia, formando estructuras alargadas muy brillantes en longitudes de onda de radio. Aunque el mecanismo exacto que genera estos chorros es aún desconocido, se sabe que está relacionado con la acreción de material por el agujero negro central, como explicamos a continuación.

#### ¿Qué mecanismo genera la enorme potencia de los núcleos galácticos activos?

Hemos dicho que nada de lo que cruza el horizonte de sucesos de un agujero negro puede escapar. Entonces, ¿de dónde proviene tanta luz? ¿qué la genera?

El mecanismo responsable se denomina “acreción”: el material (gas, polvo, estrellas) que se aproxima al agujero negro supermasivo no cae directamente en él, sino que se dispone a su alrededor en una estructura con forma de disco, que es externo al horizonte de sucesos. Por efecto de la gravedad del agujero negro, el material del disco va cayendo siguiendo una trayectoria espiral, como en un desagüe. Las fuerzas de fricción y la propia gravedad lo comprimen calentándolo a temperaturas muy elevadas. Como consecuencia emite radiación muy intensa y energética, incluyendo luz ultravioleta y rayos X, que se detectan hasta cerca del horizonte de sucesos. Eventualmente el material más interno del disco caerá en el agujero negro, que de esta manera aumentará su masa.

El mecanismo de acreción genera energía con una eficiencia muy superior (unas treinta veces más alta) a las reacciones nucleares



¿Qué activa un agujero negro supermasivo? Diferentes trabajos sugieren que la interacción entre galaxias es uno de los mecanismos responsables al menos en las galaxias activas más potentes, los cuásares. Crédito: NASA, ESA, A.Evans (U. de Virginia) et al.

en el interior de las estrellas, y explica de manera natural las enormes luminosidades de los núcleos galácticos activos.

### ¿Qué mecanismos activan y desactivan un agujero negro?

O ... ¿qué hace que despierte el monstruo de nuestra historia? ¿qué hace que vuelva a dormirse?

Hemos dicho que tan solo un 10% de las galaxias son activas. Sabemos por argumentos diversos que la actividad nuclear dura poco tiempo en comparación con la vida de las galaxias: entre diez y cien millones de años, que no es más que un instante cósmico de su existencia. Imaginemos que tenemos una habitación llena de bombillas, cada una de las cuales se ilumina durante un día al año. En un momento dado, veremos tan solo unas pocas encendidas, aunque todas llegarán a iluminarse un día u otro a lo largo del año. Unas se apagaron ya, otras aún no se han encendido. Algo similar ocurre con las galaxias. Quizás todas las que contienen agujeros negros supermasivos pasen por una fase de actividad nuclear a lo largo de su existencia, pero en un momento dado (el presente, en el que realizamos nuestras observaciones) solo un pequeño porcentaje está activo.

Como ya hemos comentado, para activar el agujero negro supermasivo es necesario transferir material (gas, polvo, estrellas) al centro de la galaxia y acercarlo lo suficiente para que se deposite en el disco de acreción, donde será comprimido y calentado antes de ser engullido por el agujero negro.

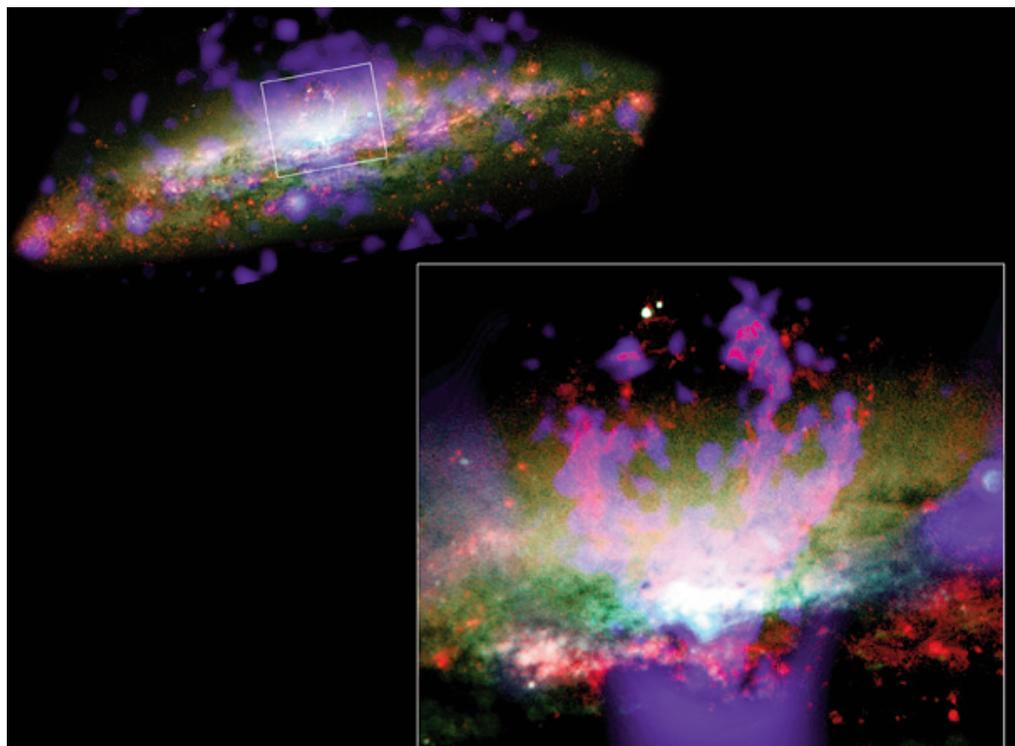
El monstruo necesita alimento para despertar, permanecerá activo mientras lo tenga disponible y volverá a su letargo cuando se agote. Por tanto, se necesita averiguar la naturaleza de los procesos capaces de transportar el alimento lo suficientemente cerca del agujero negro y la de los procesos que impiden dicho acercamiento.

Diversos mecanismos causan la acumulación de material en el centro de las galaxias, aunque no está claro cuáles son capaces de llevarlo a las cercanías del agujero

negro. Uno de ellos (no el único) podría ser la interacción entre galaxias. Las galaxias a veces se aproximan tanto entre sí debido a la atracción gravitatoria que orbitan una alrededor de la otra en una especie de danza cósmica. Pueden llegar a chocar y fundirse para formar una nueva. Se trata de fenómenos espectaculares que han dado lugar a algunas de las imágenes más bellas del universo, como vemos a la izquierda. Durante estos procesos, grandes cantidades de polvo y gas son transportadas al centro de las galaxias en interacción. La reserva resultante de combustible nuclear se consumirá en parte en la formación de estrellas y en parte en flujos de gas y polvo que, en teoría, podrían llegar a aproximarse lo suficiente al agujero negro supermasivo, propiciando así su activación.

El agujero negro se desactivará cuando deje de recibir alimento, sea porque este se agota o porque algún mecanismo “limpia” el entorno. A medida que el agujero negro engorda mediante la acreción de materia, libera una enorme cantidad de energía. Una de las consecuencias es la generación de “supervientos” debido a la aceleración del gas y el polvo existentes en la vecindad (imagen inferior). Este proceso podría barrer el material que antes alimentaba el agujero negro y expulsarlo a grandes distancias, quizás incluso más allá de los confines galácticos. En el símil de nuestro cuento, el dragón lanza grandes llamaradas que arrasan con todo lo que encuentran a su paso.

Superviento posiblemente generado por el agujero negro supermasivo en el centro de la galaxia activa NGC 3079. Crédito: NASA/CXC/STScI/U. North Carolina/ G.Cecil.



¿Qué ocurre lejos del agujero negro?

Hasta ahora hemos visto lo que ocurre en el corazón de las galaxias activas, en la cercanía del agujero negro. ¿Tiene la presencia de este efectos en el resto de la galaxia? ¿Puede la ferocidad del dragón afectar al reino entero, o solo a los habitantes que viven cerca de la gruta?

Un descubrimiento de gran importancia realizado hace tan solo unos quince años mostró que la masa de la región central o bulbo (en el caso de las galaxias espirales) o de la galaxia entera (en el caso de las galaxias elípticas) y la masa del agujero negro supermasivo se hallan relacionadas, siendo esta aproximadamente un 0,2% (dos milésimas) de aquella. Es decir, cuanto más masa tiene uno, más masa tiene el otro, como indica la imagen de la derecha. Como si lo que pesa el dragón de la historia estuviera relacionado con lo que pesan todos los habitantes del reino juntos.

Esto implica que la galaxia y el agujero negro central no se formaron y crecieron de manera independiente, sino que hubo algún mecanismo de retroalimentación que los conectaba. Sin embargo, dada la enorme diferencia en masa, la región en la que se siente la gravedad del agujero negro es diminuta en relación al de la galaxia entera. Esto puede imaginarse al comparar el tamaño de una moneda de euro con el de una ciudad como Madrid. ¿Qué mecanismos pueden conectar la evolución de algo tan pequeño y la de algo comparativamente gigantesco? Esta cuestión es actualmente

causa de un acalorado debate en la comunidad científica, puesto que su respuesta tiene implicaciones importantes en cuanto a nuestra comprensión de la formación y la evolución de galaxias.

De nuevo, los supervientos generados por el agujero negro podrían ser la explicación.

Los modelos predicen que con su enorme potencia este mecanismo podría ser capaz de expulsar gran parte del gas en las galaxias en formación, frenando de esta manera el nacimiento de nuevas estrellas y la alimentación del agujero negro. Así, la energía inyectada en el medio circundante regularía simultáneamente el crecimiento del agujero negro y el de la galaxia que lo alberga que podría así ralentizarse, llegando incluso a detenerse. Según esto, los agujeros negros supermasivos “conspiraron” en los inicios para manipular la formación de las galaxias; algo comparativamente

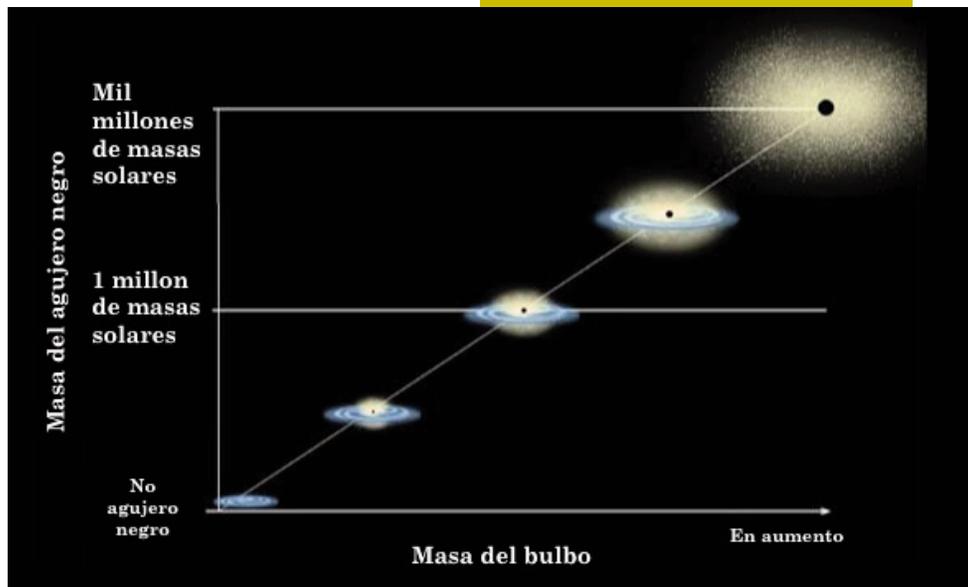
minúsculo consiguió así moldear la evolución de algo gigantesco.

El dragón de la historia no ha medido las consecuencias de su devastadora violencia: ha destruido su entorno causando dramáticas consecuencias que impiden el crecimiento futuro de la población del reino y ha provocado además su propia muerte por inanición.

¿O no ...?

¿Qué ocurrirá si un día, cuando todo parezca inerte y en calma, un aventurero temerario se arriesgue a entrar en la gruta?

¿Volverá a despertar el monstruo?



La masa del agujero negro supermasivo está íntimamente relacionada con la masa de la galaxia que lo alberga.

¿Puede un agujero negro supermasivo regular el crecimiento de una galaxia entera? Impresión artística del entorno del agujero negro en la galaxia activa NGC 3783. Crédito: ESO/M. Kormmesser





el "Moby Dick" de...

...Carolina Kehrig (IAA)

## Estrellas de la población III

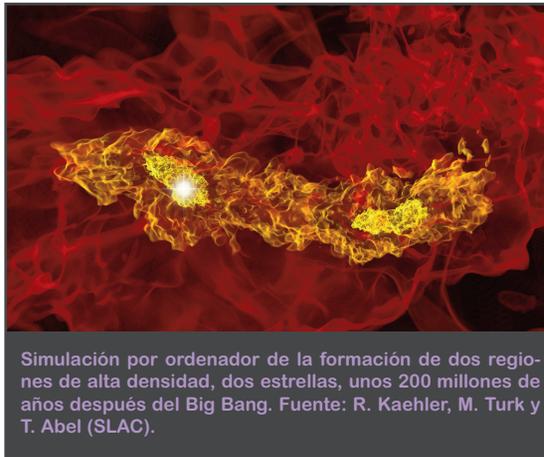


Se doctoró en Astronomía en el Observatorio Nacional de Río de Janeiro (Brasil) y ha trabajado en la Universidad de Michigan (Ann Arbor, USA) y en el *Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam* (Potsdam, Germany). Actualmente es contratada postdoctoral del proyecto "Estallidos de Formación Estelar" en el Instituto de Astrofísica de Andalucía.

Los astrofísicos han teorizado durante mucho tiempo sobre la existencia de una primera generación de estrellas —conocida como estrellas de población III— que nacieron del material primordial del Big Bang. En otras palabras, las estrellas de población III estaban "libres de metales", es decir, no contenían elementos más pesados que el hidrógeno y el helio. El nombre de población III surgió porque los astrónomos ya habían clasificado a las estrellas de la Vía Láctea como población I (estrellas como el Sol, ricas en elementos más pesados, o metales, que dominan el disco de la Galaxia) y población II (estrellas más viejas, con muy pocos metales y ubicadas en el halo y el bulbo de la Vía Láctea y en cúmulos globulares de estrellas). Debido a su composición primordial, las estrellas de población III habrían sido enormes (varios cientos o incluso mil veces más masivas que el Sol), muy calientes, grandes emisoras de radiación ionizante y habrían acabado explotando como supernovas después de tan solo unos dos millones de años. Estas estrellas son de enorme importancia cosmológica: son los principales candidatos para explicar la reionización del universo (época que tuvo lugar aproximadamente ochocientos millones de años después del Big Bang y durante la que las primeras estrellas y galaxias se hicieron visibles) y la producción de los primeros metales que enriquecieron químicamente generaciones estelares posteriores y el universo como un todo.

A las primeras galaxias que albergarían estas estrellas se les llama galaxias de población III. Los modelos teóricos predicen que los cúmulos de estrellas de población III podrían tener entre uno y cien pársecs de diámetro, mientras que las nebulosas de gas ionizado por estos cúmulos podrían llegar a tener un tamaño de aproximadamente mil pársecs. A pesar de su sólido fundamento teórico, la existencia de estas estrellas aún no ha sido confirmada observacionalmente en ninguna galaxia. La búsqueda de la prueba física directa de la existencia de las primeras estrellas y galaxias no ha dado resultados contundentes hasta ahora. Encontrar estas estrellas es muy difícil: debieron tener una vida extremadamente breve y brillaron

en un tiempo en el que el universo era en gran parte opaco a su luz. Sin embargo, debido a las altas temperaturas de las estrellas de población III predichas por los modelos, el gas ionizado por estas estrellas debe tener firmas espectrales tales como fuertes líneas de emisión de helio: la ioniza-



Simulación por ordenador de la formación de dos regiones de alta densidad, dos estrellas, unos 200 millones de años después del Big Bang. Fuente: R. Kaehler, M. Turk y T. Abel (SLAC).

ción total del helio requiere la presencia de objetos que emitan una radiación lo suficientemente intensa como para arrancar los dos electrones de sus átomos. Por ello, los astrónomos consideramos la línea de helio II un excelente rastreador de estrellas de población III y, en consecuencia, la utilizamos como un indicador (indirecto) de su existencia.

### El material primordial del universo

Mi interés por las estrellas de población III, las estrellas míticas del principio del universo y puramente teóricas hasta ahora, empezó hace casi diez años cuando inicié mi tesis de doctorado acerca de galaxias muy pobres en metales. Cuanto más pobre en metales sea el gas de una galaxia, tanto más cerca estaremos de observar el material primordial del universo, lo que hace de estas galaxias objetos fascinantes.

El año pasado, junto con mis colegas, obtuve un resultado impactante sobre la galaxia IZw18, utilizando datos tomados con el espectrógrafo de campo integral PMAS del telescopio de 3,5 metros del observatorio de Calar Alto (CAHA, Almería). La galaxia enana IZw18 sigue intrigando a los astrofí-

sicos y a mí especialmente, por ser una galaxia extremadamente pobre en metales en el universo cercano, y una de las que más se asemeja a las primeras galaxias o galaxias de población III, de modo que su estudio nos permite atisbar las condiciones que se daban en el universo primordial.

Con nuestros datos de PMAS, hemos descubierto en esta pequeña galaxia cercana una región muy extensa de helio totalmente ionizado, algo que se espera sea más frecuente en galaxias muy distantes y sin metales, como las predichas galaxias de población III. Ninguna de las fuentes de ionización convencionales observadas en el universo local, como estrellas Wolf-Rayet – estrellas muy masivas con vientos estelares muy intensos- o los choques generados por las supernovas, podrían proporcionar toda la energía necesaria para generar el halo de helio ionizado de IZw18, y de este modo tuvimos

que barajar otras opciones. Siempre recordaré los días en los que nos quedábamos, Pepe Vilchez y yo, hasta tarde en el despacho intentando interpretar todas estas observaciones. Finalmente, un día se nos ocurrió que quizás IZw18, debido a su semejanza a las primeras galaxias en su bajo contenido de metales, podría albergar estrellas peculiares casi sin metales, análogas a las estrellas de población III. Efectivamente, comprobamos que solamente los modelos de estrellas de población III podrían explicar de manera satisfactoria el flujo total de helio II de IZw18. Sigue siendo un resultado misterioso, ya que en principio la existencia de estrellas calientes sin metales se predice solamente en el universo lejano. Si IZw18 albergara estrellas análogas a las de población III supondría que pueden coexistir con poblaciones estelares más evolucionadas químicamente y no tendrían por qué formarse solamente en galaxias lejanas. Cómo funcionaría el proceso de formación de estas estrellas en este escenario es una pregunta para la que todavía no tenemos una respuesta. Hay que seguir buscando e investigando las (aún teóricas) estrellas de población III...

# C

Calar

# A

Alto

# R

high-Resolution

# M

search for M dwarfs

# E

with Exoearths

# N

with Near-infrared

# E

and optical Echelle

# S

Spectrograph

# PLANETAS AZULES EN TORNO A ESTRELLAS ROJAS

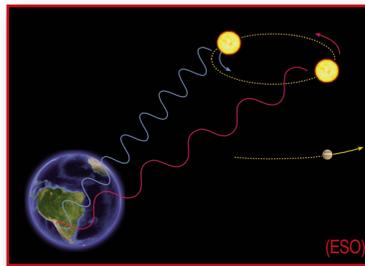
## LA BÚSQUEDA HA COMENZADO

EL PROYECTO CARMENES, REALIZADO POR UN CONSORCIO DE ONCE INSTITUCIONES ALEMANAS Y ESPAÑOLAS Y COLIDERADO POR EL INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA (IAA-CSIC), SE DISEÑÓ PARA BUSCAR PLANETAS DE TIPO TERRESTRE EN LA ZONA DE HABITABILIDAD, O REGIÓN EN TORNO A UNA ESTRELLA DONDE LAS CONDICIONES PERMITEN LA EXISTENCIA DE AGUA LÍQUIDA. TRAS CINCO AÑOS DE DESARROLLO Y SUPERADA LA FASE DE PRUEBAS, EL INSTRUMENTO SE HALLA LISTO PARA BUSCAR UNA SEGUNDA TIERRA DESDE EL TELESCOPIO DE 3,5 METROS DEL OBSERVATORIO DE CALAR ALTO (MPG/CSIC), EN ALMERÍA.

### 1 PLANETAS EXTRASOLARES

En 1995 se halló el primer planeta en una estrella parecida al Sol. Desde entonces, la búsqueda de planetas más allá del Sistema Solar ha sido intensa, y ya se cuentan más de dos mil planetas extrasolares, algunos de ellos formando sistemas planetarios. Sin embargo, la mayoría son gigantes gaseosos similares a Júpiter que giran en órbitas extremadamente cercanas a su estrella y, por tanto, hostiles para la vida.

De modo que el desafío consiste en hallar planetas de tipo rocoso -o similares a la Tierra- que, además, se encuentren en lo que se conoce como zona de



habitabilidad, la región en torno a una estrella donde un planeta puede albergar agua líquida. Estos son, precisamente, los que busca CARMENES. Sin embargo, esos planetas, o exotiertras, son esquivos. Uno de los métodos

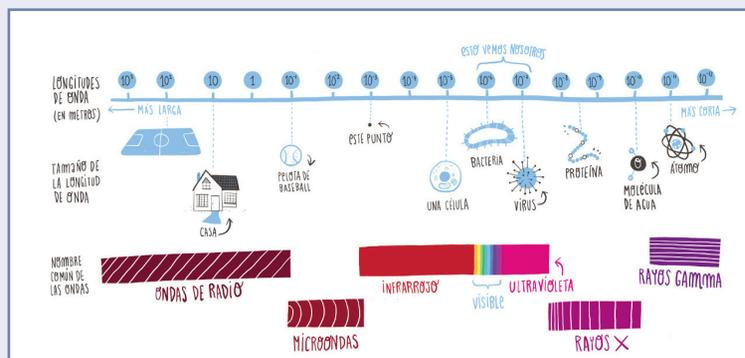
para detectar planetas extrasolares consiste en medir las pequeñas oscilaciones que los planetas producen en sus estrellas al girar a su alrededor. Unas oscilaciones tanto más pequeñas cuando menor es el planeta: por ejemplo, en el caso de nuestro Sistema Solar, Júpiter produce en el Sol una variación de velocidad de diez metros por segundo, mientras que la variación que produce la Tierra se reduce a diez centímetros por segundo. Y, aunque la tecnología para la detección de variaciones estelares ha avanzado mucho en las últimas décadas, esas variaciones resultan imposibles de detectar a día de hoy.

### 2 LAS ENANAS ROJAS

¿Un camino cerrado? No. CARMENES busca planetas en torno a enanas rojas (o enanas M), estrellas más pequeñas que el Sol que ofrecen las condiciones para la existencia de agua líquida en órbitas cercanas y en las que sí podemos detectar las oscilaciones producidas por planetas similares al nuestro. Sin embargo, esta nueva vía supuso una nueva dificultad: las enanas rojas son mucho más frías y rojizas que el

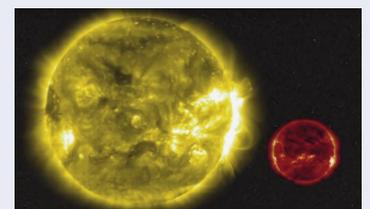
Sol, una característica que exigía, tecnológicamente, un "más difícil todavía". El instrumento CARMENES debía observar tanto en el visible, el tipo de luz que pueden ver nuestros ojos, como en el infrarrojo, un tipo de luz que solo puede detectarse con instrumentos que trabajen a muy bajas temperaturas. Un reto que CARMENES ha superado con éxito y que lo sitúa en la vanguardia del desarrollo tecnológico internacional.

Además, la observación simultánea en el visible y el infrarrojo le permitirá evitar los falsos positivos en la detección de planetas, habituales a día de hoy al confundir las señales de la actividad estelar y otros mecanismos físicos intrínsecos a la estrella con la existencia de planetas. De modo que, cuando CARMENES produzca sus primeros hallazgos sabremos, sin más comprobaciones, que estamos ante nuevas exotiertras.



Izda, espectro electromagnético (fuente: ALMA). CARMENES tiene una cobertura casi completa desde los 550 hasta los 1700 nanómetros.

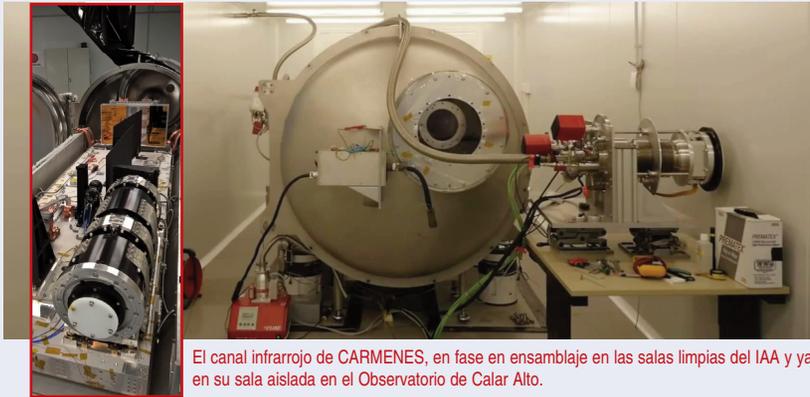
Debajo: comparación de tamaños entre el Sol y una enana roja (NASA).



### 3 UN OJO QUE FUNCIONA EN FRÍO

Una de las grandes fortalezas del instrumento CARMENES reside en que observa de forma simultánea en el visible y en el infrarrojo. Su sensibilidad a un amplio rango de longitudes de onda en el infrarrojo cercano, superior a la de los espectrógrafos de alta resolución actuales, ha supuesto un importante desafío tecnológico. También lo ha sido el hecho de que la temperatura de operación del detector infrarrojo deba hallarse a una temperatura constante de 133 grados bajo cero con una estabilidad del orden de la milésima de grado. Para ello, investigadores del Instituto de Astrofísica de Andalucía y del Observatorio Europeo Austral (ESO) han desarrollado un sistema de enfriado (criostato) que emplea un flujo continuo de nitrógeno gaseoso a baja temperatura.

En julio de 2014 llegaba a las salas limpias del Instituto de Astrofísica de Andalucía el tanque de vacío donde se alojaría el canal infrarrojo del instrumento CARMENES. Apenas un año y medio después, el canal estaba listo para su instalación en el telescopio tras haber completado los trabajos de óptica, mecánica, criovacío, electrónica y software. Un tiempo récord comparado con proyectos similares, que han tardado entre cinco y diez años en completarse.



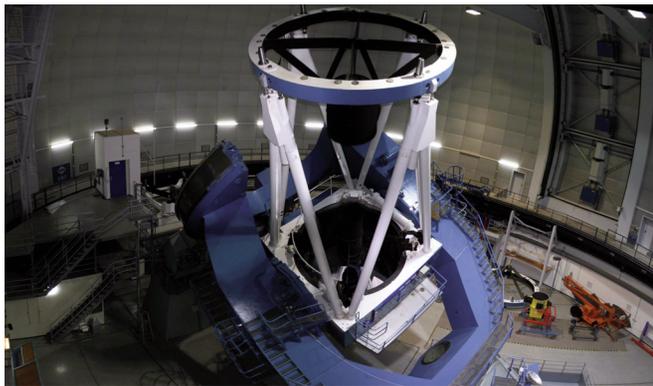
El canal infrarrojo de CARMENES, en fase de ensamblaje en las salas limpias del IAA y ya en su sala aislada en el Observatorio de Calar Alto.

CARMENES  
DETECTARÁ  
VARIACIONES DE  
VELOCIDAD EN EL  
MOVIMIENTO DE  
ESTRELLAS  
SITUADAS A  
CIENTOS DE  
BILLONES DE  
KILÓMETROS CON  
UNA PRECISIÓN  
DEL ORDEN DE UN  
METRO POR  
SEGUNDO.  
LOS  
INVESTIGADORES  
ESPERAN  
DESCUBRIR  
DOCENAS DE  
PLANETAS  
POTENCIALMENTE  
HABITABLES EN  
LOS PRÓXIMOS  
AÑOS.

### 4 FUTURO

CARMENES ha colocado al Observatorio de Calar Alto y al IAA a la vanguardia de la búsqueda de exotierras.

El sistema de enfriamiento desarrollado para CARMENES, el corazón frío que permite su estabilidad, se ha tomado como prototipo para el que se empleará en HIRES, un instrumento del Telescopio Extremadamente Grande (E-ELT) de 39 metros de diámetro que ESO construye en el desierto de Atacama (Chile).



Panorámica del Observatorio de Calar Alto. Sobre estas líneas, el telescopio de 3,5 metros donde opera CARMENES.

CARMENES cuenta con dos detectores, o dos canales, alimentados por fibras ópticas para alcanzar una cobertura casi completa desde los 550 hasta los 1700 nanómetros. Los componentes de óptica y mecánica se hallan sobre unos bancos ópticos dentro de unos tanques de vacío, que a su vez se encuentran en una sala aislada para que el instrumento permanezca completamente estable. La luz de las estrellas llega desde un frontal, situado en el foco del telescopio, y que se une con fibras ópticas al instrumento. El frontal, que cuenta con un corrector de dispersión atmosférica y una cámara de adquisición y guiado, es como el "ojo" principal, que divide la luz en dos haces y la envía a los dos canales. Ninguno de los dos canales debe tener variaciones de temperatura por encima de las centésimas de grado, pero el canal infrarrojo debe estar por debajo de los 130 grados bajo cero, para lo que se ha diseñado un criostato que funciona con nitrógeno gaseoso. El canal infrarrojo cuenta con un tipo de detector distinto al del visible, pero en el resto son casi iguales: el haz de luz de cada canal pasa por un adaptador de focal, un rebanador de imagen, un espejo colimador, una red de dispersión, de nuevo el colimador, un espejo doblador, de nuevo el colimador, un dispersor cruzado, una cámara y, por fin, el detector. También se han desarrollado exposímetros para controlar automáticamente el tiempo de duración de las exposiciones, un sistema de control con un programa que elija la mejor estrella para observar en el momento dado, y un datoducto, para la reducción y extracción automática de los espectros a los pocos segundos.

# Cien años de agujeros negros

POR ENRIQUE PÉREZ MONTERO (IAA)

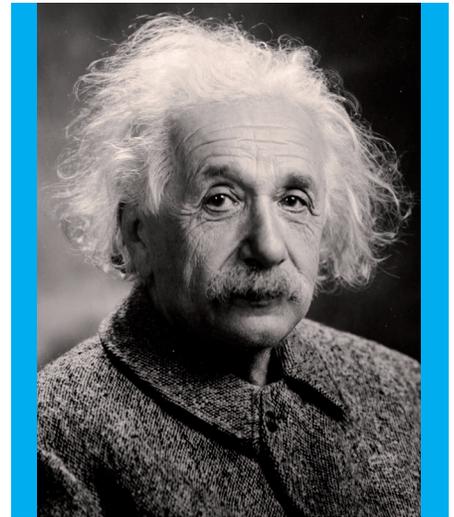
En 2015 se cumplía un siglo de la publicación del artículo de Albert Einstein que describe la teoría de la relatividad general, uno de los mayores hitos de la física teórica y cuyas connotaciones y poder predictivo aún no han sido plenamente desarrollados. La teoría de la relatividad siempre se ha asociado de manera popular a la famosa fórmula  $E=mc^2$ , que suele acompañarse de una foto del propio Einstein, ya en avanzada edad, sacando la lengua. También se suele citar uno de los aforismos menos ciertos que existen, como es “como dijo Einstein, todo es relativo” pero, ¿qué es la teoría de la relatividad?

## Velocidad de la luz y espaciotiempo

La teoría general fue precedida por otro trabajo monumental del propio Einstein, publicado en 1905 y bautizado como teoría especial de la relatividad. Esta teoría, ya plenamente confirmada por innumerables experimentos, parte de un hecho físico que es del todo contrario a la intuición y a la observación directa de todos los cuerpos en movimiento que nos rodean: la velocidad de la luz es constante independientemente de la velocidad del cuerpo que la emite y de la velocidad del observador, sea cual sea este. Nuestra percepción intuitiva de la naturaleza nos indica que esto debería ser imposible y que la velocidad que medimos de un cuerpo en movimiento debería depender de la velocidad relativa del observador. Sin embargo, eso no pasa con la luz, que siempre tiene la misma velocidad (299.792 kilómetros por segundo). Einstein dedujo que esto tiene

implicaciones serias sobre el espacio, el tiempo y la masa de los cuerpos en movimiento, aunque estos efectos solo son apreciables cuando la velocidad de ese cuerpo se acerca a la propia velocidad de la luz. Para un observador externo, un cuerpo que se mueva lo bastante deprisa parecerá más largo, su tiempo transcurre más despacio y su masa se hará mayor. Muchas veces se ha tratado de explicar esto con la mal llamada “paradoja de los gemelos”, ya que no hay nada paradójico en la misma, sino un efecto físico de lo más real, aunque curioso. Dos gemelos se despiden en la Tierra antes de que uno de ellos emprenda un viaje interestelar a una gran velocidad. A la vuelta de su viaje, que ha durado muy poco tiempo para el gemelo viajero, encuentra en casa a su hermano ya anciano.

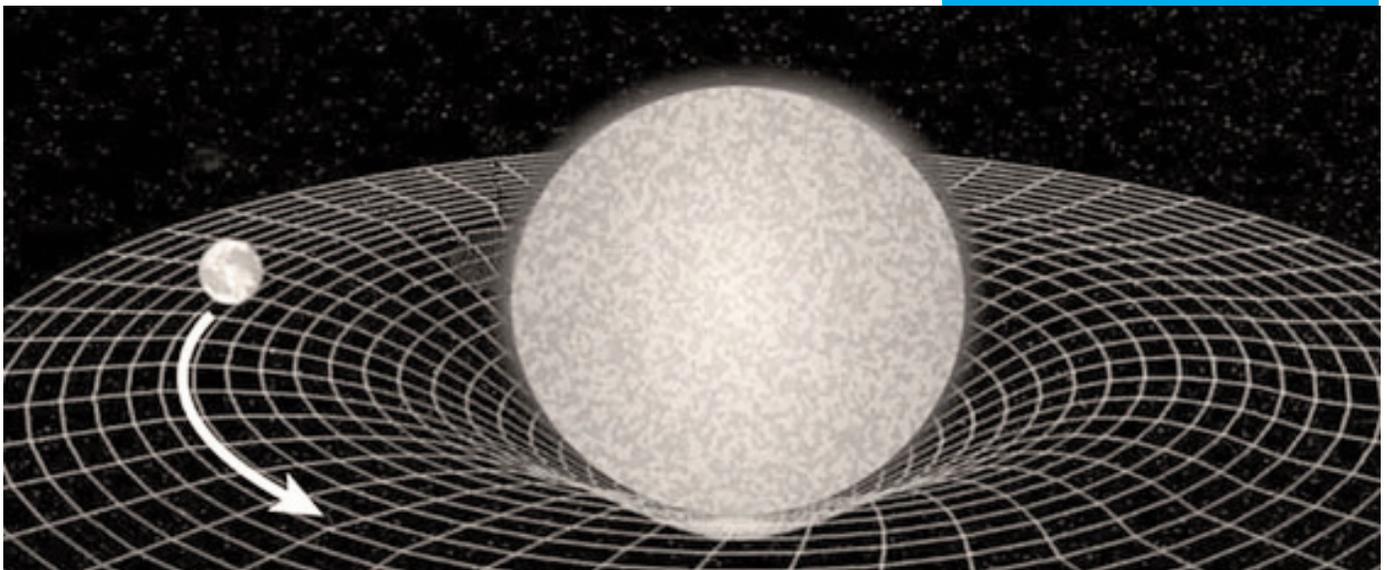
La teoría general es una ampliación de este concepto en la que Einstein se plantea qué ocurre cuando un cuerpo se mueve en un espacio ocupado por otras masas que ejercen una fuerza gravitatoria sobre el cuerpo que se mueve. De nuevo la intuición física de Einstein fue genial suponiendo que la gravedad, en vez de tratarse de una fuerza, no es más que algo que afecta al espacio y al tiempo de los cuerpos que se mueven en las proximidades de otro cuerpo. El principio en que se basa esta intuición se llama principio de equivalencia y básicamente dice que un cuerpo que se mueve en las proximidades de otro masivo se mueve a velocidad inalterable, pero en un espacio y tiempo alterados. Desde el punto de vista de la relatividad general, la Luna no se ve atraída por la Tierra, sino que se mueve a velocidad constante siguiendo una trayectoria que está curvada por la presencia de la Tierra. La

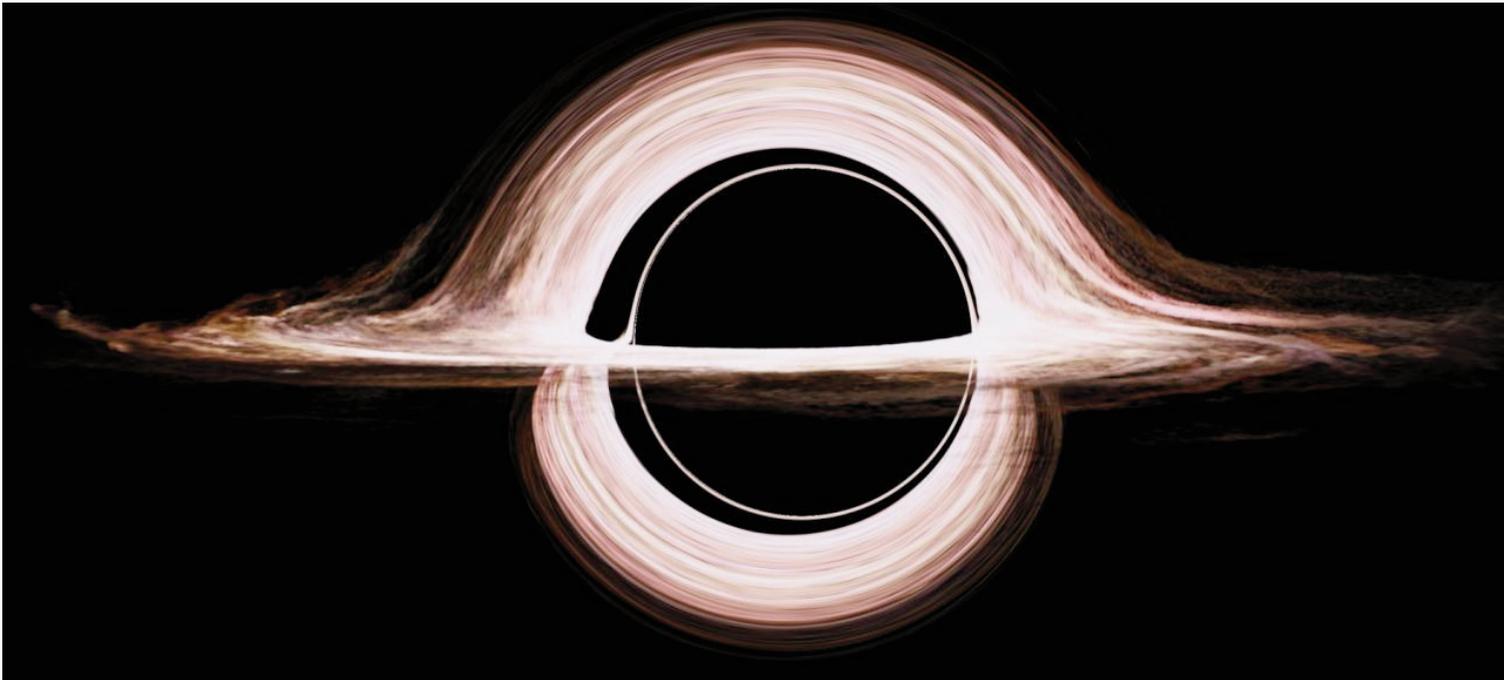


prueba más famosa de la teoría de la relatividad general se produjo cuando se confirmó que los rayos de luz, que no tienen masa y no deberían ser desviados por la fuerza gravitatoria, también ven sus trayectorias alteradas por la curvatura del espacio en torno a un objeto masivo. La posición aparente de las estrellas se ve alterada cuando se encuentran tras el Sol y pueden ser observadas si este se oculta durante un eclipse solar. Es de esta equivalencia entre masa y energía que son alteradas por la curvatura del espacio de donde viene la famosa fórmula  $E=mc^2$ .

Lo menos intuitivo de la teoría para nosotros, de nuevo, tiene que ver con el

Ilustración de cómo un objeto masivo, como el Sol, curva el espaciotiempo a su alrededor.





Simulación de un disco de acrecimiento en torno a un agujero negro (Double Negative / *Classical and Quantum Gravity*, 2015).

tiempo. El tiempo también transcurre más despacio cerca de un objeto muy masivo, y se ha comprobado que las frecuencias de los rayos de luz se ven disminuidas por la gran masa de muchas de las estrellas que la emiten. Es lo que se conoce como desplazamiento al rojo gravitatorio.

### Estrellas congeladas en el tiempo

El año siguiente a la publicación de la teoría general, el físico alemán Karl Schwarzschild resolvió las ecuaciones de Einstein en el caso en que una distribución de masa estuviera tan concentrada que curvara de manera extrema el espaciotiempo, dando lugar a un agujero negro. Curiosamente esta solución contradice tres de las características que más se suelen difundir de este tipo de objetos. En primer lugar, no se trata de un agujero, sino de una esfera de tamaño reducido que no emite luz. Una especie de estrella negra muy concentrada, no de un agujero en medio del espacio. En segundo lugar, no es cierto que los rayos de luz no puedan salir del mismo a causa de la atracción gravitatoria, sino a causa de la dilatación temporal. En el horizonte de sucesos de un agujero negro el tiempo se ha dilatado tanto que la frecuencia de la luz se vuelve nula y la luz no puede propagarse. Es como si el tiempo se congelara en esa región del espacio y todo se detuviera desde el punto de vista de un observador externo. Otra característica de los agujeros negros que contradice a lo que se suele pensar de ellos es que no tienen por qué ser muy masivos. Una estrella como el Sol podría convertirse en un agujero negro si

toda su masa se concentrara en una esfera de tan solo dieciocho kilómetros de radio. La Tierra, por ejemplo, seguiría rotando igual alrededor del Sol, como lo hace ahora, aunque este se transformara en un agujero negro. De hecho, nada impide la existencia de microagujeros negros que viajen por el universo alterando el espacio y el tiempo de todo lo que ocurre en sus proximidades.

A pesar de la solución de Schwarzschild, el propio Einstein nunca creyó que fuera posible encontrar estas estrellas congeladas en el tiempo en la naturaleza. Tuvieron que pasar cincuenta años para que los físicos aceptaran que una estrella masiva que ha agotado su combustible nuclear pueda sucumbir a los efectos de la curvatura del espaciotiempo en una implosión que termina con la propia estrella; aunque, desde la perspectiva de un observador externo, termina con el tiempo parado en la superficie de una esfera negra de tamaño muy compacto.

### Velocidad de la luz y espaciotiempo

Pero entonces, ¿los agujeros negros se han observado o son solo un artefacto que proviene de la teoría? Obviamente, por su propia naturaleza, su observación directa no es posible, pero sí se han observado regiones del espacio que casi con toda probabilidad contienen agujeros negros. La clave está en buscarlos por los efectos que su gravedad tiene en los objetos próximos a ellos. Se sabe, por ejemplo, que en el caso de estrellas binarias, una de cuyas componentes sea un agujero negro, se produce un trasvase de gas desde la otra estrella que se concentra en

un disco que rota alrededor del agujero y, a causa de la gran aceleración que adquiere, emite luz de gran energía antes de ser engullido por el agujero. La luz es emitida sobre todo en el rango de los rayos X y ha sido detectada tanto en fuentes asociadas a estrellas binarias en nuestra galaxia como en el centro de otras galaxias, lo que hace pensar en la existencia de agujeros negros supermasivos de millones de masas solares. La observación en el rango del infrarrojo de las estrellas cercanas al centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea, también revela que su movimiento está alterado por una masa invisible, casi puntual, que debe tener miles de veces la masa de nuestro Sol. Hoy en día se piensa que todas las galaxias tienen un agujero negro supermasivo en su centro y que este se formó en la misma época en que se formó la galaxia.

En todo caso, los retos asociados al estudio de los agujeros negros siguen estando en pie. Desde el punto de vista teórico queda comprender qué sucede más allá del horizonte de sucesos, lo que permitiría conectar la teoría de Einstein de un espaciotiempo curvo con la mecánica cuántica que rige el mundo de las partículas atómicas. Desde el punto de vista observacional, hacen falta datos directos que permitan un estudio más preciso de su naturaleza y su formación.

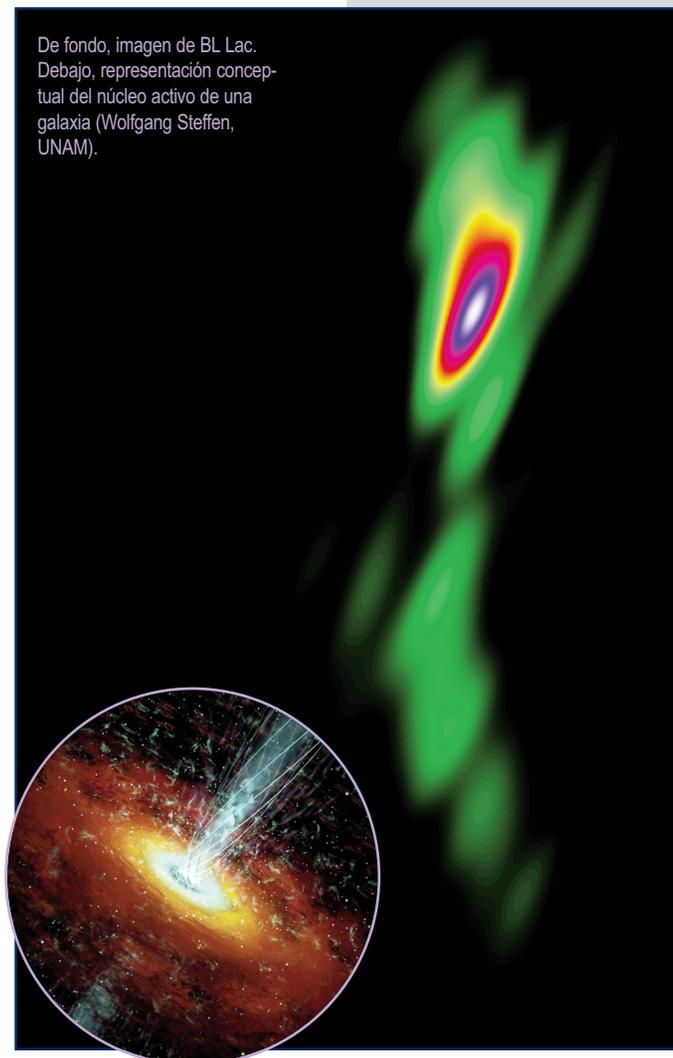
## La imagen con mayor resolución de la historia de la astronomía muestra las entrañas de un núcleo galáctico

La misión espacial RadioAstron (Agencia Espacial Rusa) ha observado, junto con otros quince radiotelescopios distribuidos por todo el globo, el entorno del agujero negro en el núcleo de la galaxia activa BL Lacertae

► Desde 1974, la técnica conocida como interferometría de muy larga base (VLBI por su acrónimo en inglés) permite que múltiples radiotelescopios separados geográficamente trabajen al unísono, funcionando como un telescopio con un diámetro equivalente a la distancia máxima que los separa. Esta técnica ha aportado imágenes con una resolución antes inconcebible, más de mil veces mejor que las que obtiene el telescopio espacial Hubble.

Ahora, una colaboración internacional ha batido todos los récords gracias al uso combinado de quince antenas terrestres y la antena de la misión espacial RadioAstron (Agencia Espacial Rusa), en órbita alrededor de la Tierra. El trabajo, liderado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), aporta nuevas claves para el estudio de las galaxias activas, donde un agujero negro supermasivo absorbe el material que le rodea al tiempo que produce un par de chorros (o *jets*) de partículas energéticas que viajan a velocidades cercanas a la de la luz.

La astronomía en ondas de radio, un tipo de luz indetectable a nuestros ojos, resulta imprescindible para el estudio de las galaxias activas dado que sus jets emiten la mayor parte de su energía en ondas de radio. Pero las galaxias activas se encuentran a miles de millones de años luz de la Tierra, de modo que para poder estudiar estos objetos necesitamos obser-



De fondo, imagen de BL Lac. Debajo, representación conceptual del núcleo activo de una galaxia (Wolfgang Steffen, UNAM).

varlos con una resolución cada vez mejor. “Al combinar por primera vez antenas terrestres y la antena en órbita RadioAstron hemos logrado la resolución que tendría una antena con un tamaño equivalente a ocho veces el diámetro terrestre, unos veinte microsegundos de arco”, apunta José Luis Gómez, investigador del IAA que encabeza el estudio. Visto desde la Tierra, estos veinte microsegundos de arco corresponderían al tamaño de una moneda de dos euros en la superficie de la Luna, una resolución que ha permitido atisbar con una precisión inigualable las regiones centrales del objeto conocido como BL Lacertae, el núcleo activo de una galaxia situado a nove-

cientos millones de años luz y que está alimentado por un agujero negro de unas doscientos millones de veces la masa de nuestro Sol.

### Objetos extremos

Los núcleos de galaxias activas (o AGNs, de su nombre en inglés) son los objetos más energéticos del universo, pudiendo emitir de forma continua más de cien veces la energía liberada por todas las estrellas de una galaxia como la nuestra. “La resolución proporcionada por RadioAstron, sin precedentes en la historia de la astronomía, nos permite una visión única de las regiones mas internas de los núcleos activos, donde se produce la mayor parte de

su energía”, comenta Yuri Kovalev (Astro Space Center), Director Científico de la misión RadioAstron y miembro del equipo.

La hipótesis predominante sostiene que los AGNs están alimentados por un agujero negro supermasivo rodeado de un disco de materia que gira a su alrededor. Debido a esta rotación las líneas de campo se “enrollan” formando una estructura helicoidal que confina y acelera las partículas que forman los jets. “El estudio de BL Lacertae ha aportado un dato fundamental para la confirmación de este escenario, ya que ha permitido obtener la primera evidencia directa de la existencia de un campo magnético helicoidal a gran escala en un AGN”, señala José Luis Gómez (IAA-CSIC).

Además, la excelente resolución obtenida en la primera imagen de VLBI espacial obtenida con la misión RadioAstron ha supuesto otro hito, al medir en el núcleo del jet en BL Lacertae una concentración de energía (radiación emitida por unidad de área) muy por encima de lo observado hasta ahora en los AGNs, y que levanta dudas sobre los modelos teóricos empleados hasta ahora para explicar cómo brillan estos objetos. “En BL Lacertae estamos observando las zonas más calientes del Cosmos, un ‘horno’ miles de millones de veces más caliente que el Sol”, comenta Andrei Lobanov (MPIfR), co-investigador del trabajo. “Los astrofísicos manejamos un modelo para explicar cómo se genera la energía de los AGNs que pone un límite a la cantidad total que puede emitir su núcleo. Estos objetos pueden presentar aumentos puntuales de energía durante uno o dos días, pero las energías medidas en BL Lacertae son demasiado elevadas y constantes, lo que implica que o bien el jet es más relativista de lo que pensamos o tenemos que revisar nuestros modelos teóricos”, concluye José Luis Gómez (IAA-CSIC).



# Se cuestionan los resultados obtenidos hasta ahora en el estudio de estrellas pulsantes

Un estudio, que emplea datos ultraprecisos de los satélites CoRoT y Kepler, aporta dos ejemplos que ponen en duda el uso de una herramienta empleada en casi todos los estudios de oscilaciones estelares

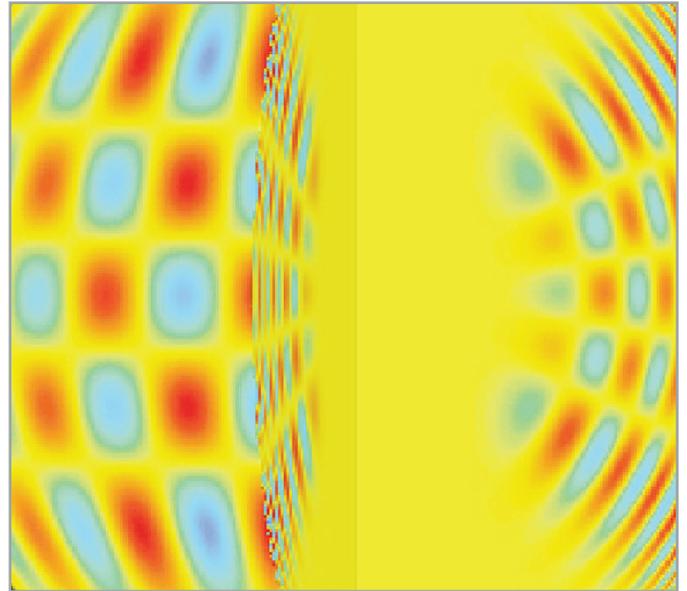
► El movimiento del gas dentro de las estrellas produce ondas sísmicas, que a su vez provocan deformaciones en su superficie. Y estos "terremotos" (o pulsaciones) estelares se traducen en cambios periódicos en la luminosidad de la estrella, cuyo estudio permite determinar la estructura y los procesos físicos que ocurren su interior. Un grupo de investigadores del IAA y de la Universidad de Granada (UGR) ha revisado las herramientas empleadas en la interpretación de este tipo de datos y ha hallado que el método empleado desde hace décadas no puede usarse de manera universal.

Existen varios casos en los que el estudio de estas pulsaciones (conocidas genéricamente como variabilidad estelar) constituye un problema: casos de estrellas con periodos de pulsación donde ningún modelo predice, otras que presentan un anó-

malo exceso de modos de pulsación o la imposibilidad de hallar modos de pulsación que los modelos predicen. "Ante estos problemas, decidimos revisar todo el proceso de análisis, incluidas las herramientas con las que se interpretan los datos", señala Javier Pascual, investigador del IAA que encabeza el trabajo.

Y hallaron un escollo en lo que conoce técnicamente como periodograma. "Un caso ideal para el estudio de la variabilidad sería observar la estrella por tiempo infinito y comprobar la frecuencia con la que pulsa. Pero como esto es imposible, empleamos los periodogramas para extraer su frecuencia a partir de un intervalo de tiempo de observación limitado, asumiendo que esa frecuencia se mantiene constante en el tiempo", apunta Javier Pascual (IAA-CSIC). Pero para que el uso de periodogramas esté justificado existe un requerimiento: que la curva de luz de la estrella, que muestra los aumentos y descensos en su luminosidad, varíe de forma suave.

"Hasta ahora se había dado por supuesto que las pulsaciones estelares eran suaves, y nosotros nos preguntamos hasta qué punto era así, ya que sí hay fenómenos que pueden originar variaciones abruptas", apunta Pascual (IAA-CSIC). Y hallaron que HD174936 y KIC006187665,



Representación de las ondas acústicas en una estrella. Fuente: ESO.

estrellas observadas por los satélites CoRoT y Kepler respectivamente, presentaban en efecto variaciones abruptas, lo que constituye un indicio inequívoco de que la herramienta de análisis empleada hasta ahora no es la adecuada en todos los casos.

## Más allá de la física estelar

Los periodogramas se emplean en multitud de ámbitos científicos, desde la geología o la biología hasta la econometría. "Este hallazgo supone un ejemplo de que, contrariamente a lo esperado, los periodogramas no pue-

den emplearse en todos los casos de estudio -apunta Javier Pascual (IAA-CSIC)-. Y, al emplearse sin comprobar si las condiciones iniciales de fenómeno justifican su uso, pueden derivar en resultados erróneos".

"Y, de igual modo que esto ocurre para la variabilidad estelar y requiere una revisión de las herramientas de análisis, muy posiblemente pueda extenderse a otras áreas de estudio en las que el uso de periodogramas resulta habitual", concluye el investigador.

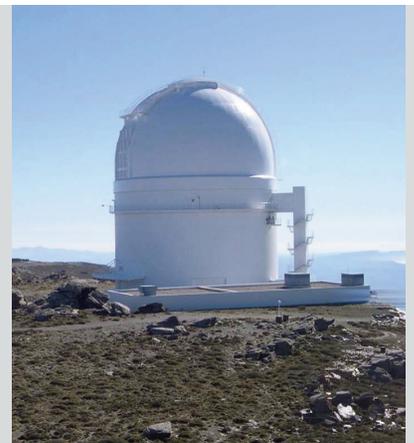
Silbia López de Lacalle (IAA)

## EN BREVE:

### La Agencia Espacial Europea (ESA) buscará objetos potencialmente peligrosos desde el Observatorio de Calar Alto

► Los NEOs (acrónimo del inglés *Near Earth Objects*) son cometas o asteroides cuyas órbitas, posiblemente modificadas por la atracción gravitatoria de los planetas, los conducen a regiones cercanas a la órbita terrestre. Aunque las posibilidades de un impacto con la Tierra son muy reducidas, la comunidad científica está desarrollando programas para detectar y estudiar estos objetos. El Observatorio de Calar Alto (CAHA, MPG/CSIC) ha firmado un acuerdo con la Agencia Espacial Europea (ESA) para el uso exclusivo de uno de sus telescopios en su campaña de detección de NEOs.

El acuerdo, que contempla una primera etapa hasta marzo de 2017 y automáticamente prorrogable, cede a la ESA en uso del telescopio Schmidt de 80 centímetros del observatorio. Se trata de un telescopio que había caído en desuso en 2001 y que los técnicos del observatorio han recuperado para la observación en remoto.



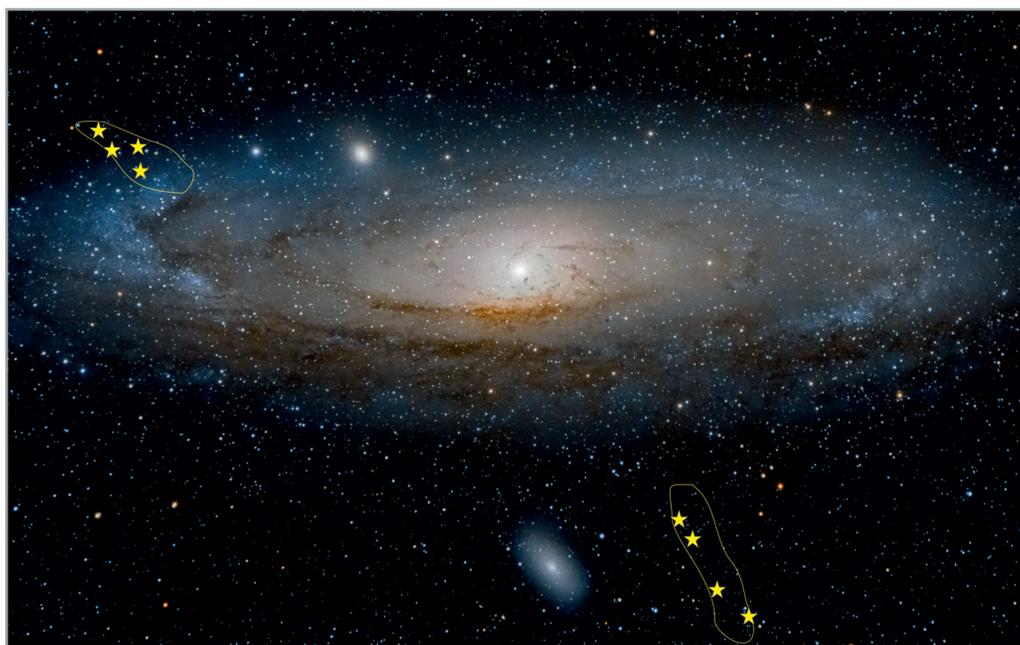


Imagen de Andrómeda donde se han señalado las ubicaciones aproximadas de las dos estructuras mayores: el "Espolón del norte" (arriba) y la "Corriente gigante" (debajo dcha).

## Estudian la historia de la galaxia Andrómeda a través de sus cadáveres estelares

El trabajo apunta a que estas subestructuras tienen un mismo origen, y que muy posiblemente son producto de la interacción de Andrómeda con una de sus galaxias satélite

► La galaxia Andrómeda (o M31) es la galaxia masiva más cercana, y constituye un excelente laboratorio para estudiar las características e

historia de las grandes galaxias espirales como nuestra galaxia, la Vía Láctea. Un grupo internacional de investigadores, encabezados por el IAA, ha estudiado con el Gran Telescopio Canarias una muestra de nebulosas planetarias situadas en las dos subestructuras principales de M31 y ha hallado que estas estructuras podrían deberse a la interacción de Andrómeda con sus galaxias satélite.

"Sabemos que las grandes galaxias crecen absorbiendo galaxias menores, y que los vestigios de esas fusiones pueden hallarse en las regiones

externas de las galaxias, en forma de colas o regueros de estrellas", señala Xuan Fang, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que encabeza el trabajo. El estudio de la composición química y el movimiento de esas estrellas puede aportar valiosos datos sobre la historia de formación de la galaxia.

"Hace poco más de una década se descubrieron en Andrómeda unas subestructuras que podrían ser restos de su proceso de formación e interacción con otras galaxias cercanas. Como se trata de subestructuras muy débiles y resulta muy difícil estu-

diar sus estrellas, observamos las nebulosas planetarias, que sí pueden detectarse sobre el débil fondo", apunta Rubén García Benito, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que participa en el estudio.

Las nebulosas planetarias son estrellas similares al Sol que, tras agotar su combustible, se desprenden de sus capas externas y conservan un denso núcleo central, que se conoce como enana blanca, rodeado de una envoltura fluorescente. El equipo estudió siete nebulosas situadas en el "Espolón del norte" y en la "Corriente gigante", las dos subestructuras principales de Andrómeda que se hallan en ambos extremos de la galaxia, la segunda muy alejada del disco galáctico.

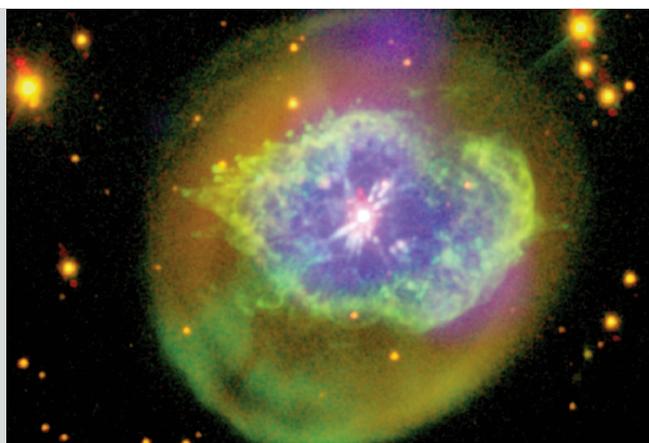
"Estudios anteriores del movimiento de nebulosas planetarias en estas subestructuras habían indicado que podían tener un origen común, y nosotros queríamos comprobar si era así analizando la composición química de las nebulosas", indica Fang (IAA-CSIC). Gracias al Gran Telescopio Canarias corroboraron que, en efecto, las nebulosas muestran tanto abundancias químicas como movimientos similares.

"Esto nos lleva a la conclusión de que tanto el 'Espolón del norte' como la 'Corriente gigante' pueden tener un origen común, muy posiblemente ligada a la interacción de Andrómeda con M32, una de sus galaxias satélite", concluye el investigador.

### Abell 78: la estrella que renació

► Tras los bellos colores de la nebulosa Abell 78 se esconde un curioso renacimiento estelar. En el centro se halla una estrella moribunda, similar a nuestro Sol, que había expulsado sus capas externas en su camino hacia la extinción pero que, por un tiempo, regresó a una fase estelar anterior, la de gigante roja, y después repitió su trayecto hacia la fase de nebulosa planetaria. La liberación de las capas externas es un proceso habitual en las estrellas de entre 0,8 y ocho masas solares, cuando su combustible nuclear se agota.

"Sin embargo, la vuelta a la vida de Abell 78 sí que resulta excepcional. Se encuentra entre los muy pocos casos en los que la estrella revive a pesar de que el núcleo ha dejado de producir energía", apunta Jesús A. Toalá, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía que encabeza la investigación.



# Rosetta confirma que el cometa 67P se formó por la fusión de dos objetos

Los dos lóbulos del cometa impactaron entre sí muy lentamente durante la formación del Sistema Solar

► Los investigadores que participan en la misión *Rosetta* (ESA), entre los que se encuentran científicos del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), han dado con la clave de su particular forma irregular, que recuerda a la de un patito de goma: el cometa surgió de la fusión de dos objetos independientes durante la formación del Sistema Solar.

Los resultados, publicados en la revista *Nature*, se han obtenido gracias al análisis de las imágenes procedentes de la cámara OSIRIS de la sonda *Rosetta*. Los dos objetos independientes que forman el cometa, uno más grande que el otro, están compuestos de un material muy similar y se caracterizan por un sistema de capas que se asemeja al de una cebolla.

## Fusión no violenta

“Como los estratos de cada uno de los lóbulos del cometa son morfológicamente muy uniformes, sabemos clarísimamente que son objetos independientes primitivos, que se formaron por acreción de material más o menos en la misma región y que, después, se fusionaron de forma lenta”, explica el investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía José Juan López Moreno.

De hecho, hasta ahora nunca se había observado una interacción entre dos cuerpos del Sistema Solar que no fuese excesivamente violenta. “Nuestra investigación es relevante porque se trata de la primera firma de una interacción no violenta entre dos cuerpos de nuestro sistema planetario”, agrega el investigador. La peculiar forma del 67P, en concreto, su morfología irregular, aporta a los científicos una visión inesperada de su interior y, por primera vez, permite reconstruir la estructura por debajo de la superficie de un cometa de varios cientos de metros de profundidad atendiendo a observaciones geoestructurales.

La sonda *Rosetta* lleva orbitando en torno al cometa 67P desde el 6 de agosto de 2014. Hasta la fecha, la misión ha conseguido determinar que es un cuerpo la mitad de denso que el agua y que, dado su tamaño, debe de estar vacío en un 80%. A falta de imágenes precisas de algunas zonas del hemisferio Sur, se han clasificado 19 regiones en el núcleo del cometa. Estas zonas 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.



Fuente: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA

## Rosetta observa actividad en los "pozos" del cometa 67P y permite determinar cómo se forman

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.

Las observaciones del cometa 67P por la cámara OSIRIS de la misión *Rosetta* (ESA) han permitido detectar actividad en los pozos cometarios por primera vez y establecer el mecanismo que los produce.

“Desde julio a diciembre del pasado año observamos el cometa 67P desde apenas ocho kilómetros de la superficie, lo que nos ha permitido resolver estructuras con un detalle inigualable”, señala Pedro J. Gutiérrez, investigador del IAA que participa en la misión y que alertó al resto del equipo de la existencia de chorros de gas y polvo emergiendo de las paredes de estos pozos.

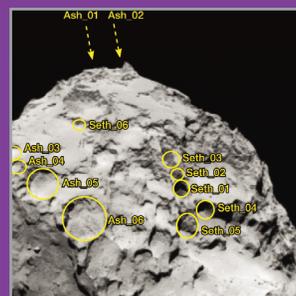
Estos chorros se producen cuando los hielos del núcleo del

cometa subliman y son uno de los rasgos de lo que se conoce globalmente como actividad cometaria, que genera la coma y las colas de los cometas y que también abarca fenómenos explosivos que liberan gran cantidad de material de forma repentina. De hecho, se creía que estos estallidos se hallaban en el origen de los pozos cometarios.

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.

Aunque el colapso es repentino, la cavidad puede datar de la formación del núcleo cometario o deberse a la sublimación de hielos más volátiles que el de agua, como el de monóxido o dióxido de carbono, o a la existencia de una fuente de energía interna que desencadene la sublimación.



## Un nuevo mecanismo

“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

# SALA limpia



por Miguel Abril (IAA)

## la respuesta:

¿Qué dimensiones máximas debe tener un dispositivo o mecanismo para que pueda considerarse nanotecnología?

- A. 1 milímetro
- B. 1 nanómetro
- C. 100 nanómetros
- D. Nanotecnología es cualquier máquina que lleve tornillos como los de mis gafas, que son chiquitísimos.

A nda que no son pequeños los tornillos de unas gafas... Los mira uno y se pregunta cómo podrán hacerlos así, qué máquina usarán para fabricarlos y cómo será la punta que grave esa rosquita tan mona. Bueno, pues para un dispositivo nanotecnológico un tornillo de gafas viene a ser como la torre Eiffel para una cucaracha, porque se considera que algo pertenece al mundo de la nanotecnología cuando al menos una de sus dimensiones no supera los cien nanómetros. Coge una regla. Mira las divisiones más pequeñas, las de los milímetros. Divide una de ellas en mil partes, esa a su vez en diez, y... vale, vale, que ya lo has entendido. Es que a mí no deja de impresionarme que se puedan hacer cacharritos tan pequeños y que, además, sirvan para algo. Claro, que la cosa no es exactamente como la imaginamos: la nanotecnología no es la reducción de nuestro mundo macroscópico a otro mucho más pequeño. Parte de la culpa de que tengamos esa idea es de los propios nanocientíficos (que noooo, no son científicos chiquititos, son científicos que se dedican a estudiar todo esto), que para demostrar hasta qué punto llega su capacidad de manipular

lo pequeño nos muestran, por ejemplo, una guitarra cuyas cuerdas están hechas con átomos individuales y que se puede tocar con un rayo láser (buscad 'nanoguitarra' en google). Y, al verlo, pues uno se ve ya bailando en un nanoconcerto en un nanobar la noche del nanosábado. La realidad es que es muy complejo manipular la materia a pequeña escala, y por eso uno de los preceptos de la nanotecnología es la búsqueda de la simplicidad. Otro de sus pilares básicos es la inspiración en la naturaleza. Se ha dicho que la vida es la musa de la nanotecnología, porque es el único sistema conocido que funciona usando exclusivamente los preceptos de esta. Así las cosas, no debe sorprendernos que, por ejemplo, la mayoría de los llamados nanomotores que se están desarrollando se parezcan mucho más a moléculas como la kinesina (que, como todos sabemos, transporta macromoléculas de un lado a otro de las células dando pequeños pasos sobre microtúbulos del citoesqueleto), que a lo que vemos cuando abrimos el capó de nuestro coche. Con esta filosofía se han conseguido microvehículos propulsados con motores moleculares que se desplazan a la increíble

velocidad de... ¡varios miles de micrómetros por segundo! (Pausa dramática) Vale, dicho así igual no suena muy impresionante, pero si lo ponemos en contexto, eso quiere decir que alcanza velocidades de unas 375 veces su longitud por segundo, cuando un Ferrari no pasa de 20.

Uno de los campos más beneficiados por la nanotecnología va a ser el de la medicina, especialmente el tratamiento de enfermedades como el cáncer. El uso de biosensores y nanosistemas dispensadores específicos facilitará tanto la detección precoz de tumores como el tratamiento localizado de estos, reduciendo las dosis del fármaco para limitar los efectos secundarios de la quimioterapia. Hasta tal punto la nanotecnología se inspira en la naturaleza que otra de las líneas de investigación intenta aprovecharse del trabajo de millones de años que ya ha hecho la evolución: en lugar de diseñar y construir sus propios nanodispositivos, varios grupos están "domesticando" virus para conseguir que detecten las células cancerígenas y liberen en su interior una dosis letal de un determinado fármaco en lugar de su malicioso material genético. Mención aparte merecen los materiales compuestos (más conocidos como composites), entendidos como materiales que constan, al menos, de dos fases sólidas: una continua, la matriz, y otra dispersa en ella, el refuerzo. La interacción entre ambos conduce a un material con propiedades mejoradas respecto a las de sus componentes

individuales. Aunque se les pone la etiqueta de nuevos materiales, en realidad se conocen ejemplos de su uso en la antigüedad. Tal es el caso de las pinturas mayas del yacimiento de Bonampak, en México, descubierto a mediados del siglo XX. Los murales, tras más de doce siglos expuestos a las duras condiciones ambientales de un entorno selvático, sorprendieron a los expertos por la luminosidad y brillo del tono bautizado como 'azul maya', obtenido de un colorante orgánico conocido como índigo o añil. Cuando se analizó el compuesto resultó ser un microcomposite, en el que las partículas de pigmento se encontraban atrapadas en la red de canales de un mineral arcilloso, la paligorskita. La síntesis fue realizada por los mayas sin saberlo, al lavar el índigo en aguas ricas en el mineral. Hoy en día, los nanocomposites se usan como materiales de envasado, en carrocerías de automóviles o en fuselajes de aviones, debido a sus excelentes propiedades mecánicas.

Actualmente la nanotecnología se ha hecho un hueco principalmente en el diseño de material y tejidos deportivos y en el área de la cosmética. En medicina y alimentación las increíbles innovaciones que se están experimentando en los laboratorios tardarán algo más en llegar, debido a los estrictos controles que tienen que pasar. Apasionante, ¿verdad? Y eso que, para no haceros *spoiler* del próximo número, he conseguido escribir todo esto sin nombrar la palabra mágica...

## la pregunta:

¡GRAFENO! Todos hemos oído hablar de este material de expectativas grandiosas y orígenes paradójicamente humildes, sobre el que os hablaré en el próximo número. Uno de los nombres de los siguientes compuestos relacionados con el grafeno es inventado, el otro es real. ¿Cuál eliges? ¿Blanco o

negro? ¿Hacha o espada? ¿Pildora azul o roja?

### RESPUESTAS

- A) BUCKMINSTERFULLERENOS
- B) WESTMINSTERABBEYCELLS

"Debes elegir, Neo".



# EL ORIGEN DEL UNIVERSO

## Pilares científicos

Solo durante los últimos cien años la ciencia nos ha permitido considerar el origen del universo como algo que podemos estudiar de modo formal, sin recurrir a mitos o religiones. Durante aproximadamente la mitad de esos cien años la mayor parte de los estudios fueron matemáticos o de índole teórica: consideraciones sobre la geometría y las propiedades dinámicas del universo, estimaciones de las condiciones físicas durante los primeros instantes y las reacciones nucleares que hubieran podido tener lugar... Desde los años sesenta del siglo pasado ha sido posible analizar datos observacionales que limitan las posibles avenidas por las que los modelos podían derivar. Finalmente, solo en los últimos diez o quince años se han logrado datos que tienen suficiente precisión como para permitir que la cosmología pueda code-

arse con otras ramas de la física, ajustando los parámetros de los modelos hasta niveles difíciles de imaginar para generaciones anteriores de astrónomos. Los principales pilares en los que se basa esta nueva época de la cosmología son:

**LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO.** Predicha ya por Georges Lemaître hace casi cien años a partir de las ecuaciones de Einstein. Este se horrorizó de la idea ("sus ecuaciones son correctas, pero su física es abominable" se cuenta que le dijo), pero tuvo que aceptarla cuando al final de la década de 1920 las observaciones de Edwin Hubble, unidas a las previas de Vesto Slipher, no dejaron duda: las galaxias del universo se alejan unas de otras a velocidades proporcionales a la distancia entre ellas. Si pudiéramos dar marcha atrás al tiempo, las veríamos acercarse, hasta acabar concentradas en un punto de densidad infinitamente alta. Al mismo tiempo, siguiendo la termodinámica básica, veríamos subir la temperatura hasta alcanzar valores

más altos que los que se encuentran en los núcleos de las estrellas.

**LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL UNIVERSO.** Entre los años cuarenta y cincuenta del siglo pasado el matrimonio formado por Margaret y Geoff Burbidge, junto con William Fowler y Fred Hoyle, aplicaron las fórmulas de la entonces recién nacida física nuclear al cálculo de las reacciones que podrían tener lugar en los núcleos de esas estrellas. Casi simultáneamente George Gamow y sus colaboradores Ralph Alpher y Robert Herman usaron cálculos similares para estimar las reacciones en aquel indeciblemente caliente universo primitivo. El resultado no dejaba lugar a dudas: tras los primeros veinte minutos en la historia del universo, la composición sería sencilla: 75% de hidrógeno, 25% de helio, y trazas minúsculas de litio, berilio, y otros isótopos ligeros como el deuterio o el helio-3. Todos los demás elementos de la tabla periódica se cocinarían en nuevas generaciones de estrellas durante los siguientes miles de

## Incertidumbres

La sección anterior puede dar la impresión de que "todo está controlado". Nada más lejos de la realidad... Es cierto que nuestro modelo del universo funciona muy bien para explicar lo que vemos a nuestro alrededor, pero también es verdad que conseguirlo exige aceptar una serie de condiciones:

● Toda la materia que vemos a nuestro alrededor representa solo aproximadamente el 10% de la materia que debe existir. Esta observación se repite a todas las escalas cósmicas, desde la de las galaxias individuales hasta la de los cúmulos de galaxias y el universo como un todo (en todos los casos la gravedad revela que hay un exceso de masa, que nuestros ojos no pueden ver). Además, esa "materia oscura" que no vemos no puede simplemente ser materia normal que de algún modo escapa a nuestros instrumentos. Si

lo fuera alteraría el frágil equilibrio químico que se observa en el universo, y la receta esperada no encajaría con la realidad. Por tanto, esperamos la detección de algún tipo de partícula exótica que pueda explicar este rompecabezas: cuerdas, axiones, wimps... quién sabe. Tal vez incluso necesitamos una nueva comprensión de la propia gravedad.

● El universo contiene una gran cantidad de "algo" que actúa como la gravedad, pero exactamente al revés, y sabemos esto porque cuando miramos al pasado vemos que la velocidad de expansión era menor que la que observamos hoy. Esto contradice absolutamente nuestras expectativas. No conocemos ningún ente físico con esas propiedades. Lo he presentado como "algo" porque solo sabemos que no puede ser material, ya que no tiene masa. Podría ser un campo de características extrañas, o quizás una propiedad del espa-

cio vacío. El caso es que un 70% del contenido del universo está formado por esta sustancia, a la que denominamos "energía oscura". En realidad, la llamamos así por falta de un nombre más bonito, como por ejemplo, no sé, "quintaesencia"... ay, no, espera, hay gente que la llama precisamente así...

● Nadie sabe por qué hay "algo en lugar de nada". En las primeras etapas del universo, por simetría deberían haberse formado iguales cantidades de partículas y de antipartículas. Y con el paso de los miles de millones de años, todas deberían haberse aniquilado entre sí, dejando únicamente un fondo de energía. Pero nuestro universo tiene materia, y no antimateria. Existen modelos bien argumentados de física de partículas que pueden explicar esa asimetría, pero no es un problema que pueda considerarse totalmente resuelto.

● La geometría del universo es euclidiana,

millones de años hasta nuestros días. Nosotros somos seres compuestos de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, fósforo y azufre, y vivimos en un planeta formado de níquel, aluminio, hierro y silicio... la receta "hidrógeno + helio" nos parece extraña, pero todas las observaciones que se han hecho muestran que así es en realidad, y nosotros vivimos en un ínfimo "reducto metálico" creado por las consecutivas generaciones de estrellas nacidas y muertas en nuestro rincón de la Vía Láctea.

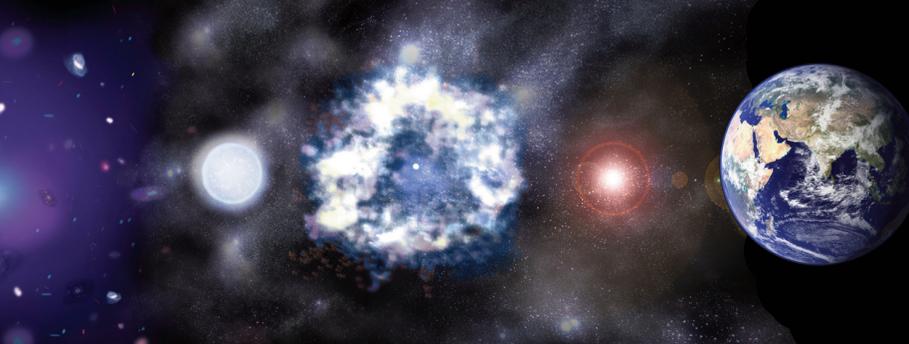
**LA TEMPERATURA DE FONDO.** A la vez que los físicos calculaban la composición química del universo estimaban también su evolución térmica. Esta indicaba que aquel infierno de los primeros minutos se habría enfriado progresivamente hasta la actualidad, y que la temperatura presente estaría en algún sitio entre los 3 y los 50 K. Varios grupos plantearon la posibilidad de llegar a medir esta temperatura de fondo. Los grupos liderados por Andrei Doroshkevich e Igor Novikov en Rusia y

Robert Dicke en Princeton llegaron a diseñar prototipos de detectores para ello. Pero fueron adelantados por Arno Penzias y Robert Wilson, que descubrieron e identificaron la radiación de fondo de microondas, el eco térmico de la gran explosión, con una antena de telecomunicaciones en 1965. Hoy sabemos que su temperatura es de 2,7 K.

Todas estas observaciones han sido progresivamente refinadas, con sensibilidades y volúmenes de datos cada vez mayores. Hoy la sonda europea Planck ha medido la temperatura de la radiación de fondo en más de cincuenta millones de puntos independientes del cielo, en nueve frecuencias diferentes y con una precisión de unas pocas partes por millón. Los nuevos proyectos de cartografiados cosmológicos esperan medir las posiciones y velocidades de cientos de millones de galaxias repartidas por todo el cielo. Y la disponibilidad de espectrógrafos de última generación en telescopios de gran tamaño nos

permite medir en las estrellas abundancias de elementos tan poco habituales como el uranio o el torio.

Gracias a ello disponemos de un modelo muy detallado de cómo ha sido la historia del universo. Sabemos que hace unos 13.800 millones de años surgió de modo espontáneo, y que inicialmente consistió exclusivamente en una sopa de radiación a temperatura inimaginablemente alta. Tras una fracción de segundo se expandió y enfrió lo suficiente para que a partir de esa radiación comenzaran a "solidificarse" partículas y entidades progresivamente más complejas: quarks, neutrinos y electrones; protones y neutrones; y, al alcanzar aproximadamente veinte minutos de vida, los primeros núcleos atómicos. El universo se tomó después 380.000 años hasta enfriarse lo suficiente como para que los átomos de hidrógeno pudieran resistir la temperatura sin romperse. Y, desde entonces, la gravedad ha continuado su labor inexorable para dar lugar a todo lo que vemos a nuestro alrededor.



(NASA/CXIM>Weiss)

como la que todos aprendimos en la escuela y podemos dibujar encima de una mesa. Pero existen otras geometrías "no planas" perfectamente respetables, la más famosa de las cuales es la geometría que vemos en la superficie de una esfera. En ella no existen líneas paralelas, y los ángulos de un triángulo no suman 180 grados, por ejemplo. La geometría plana o euclídea es precisamente un punto crítico, que corresponde a un valor exacto de la densidad del universo. Una densidad infinitesimalmente mayor o menor hubiera dado lugar a una geometría diferente. ¿Por qué ese ajuste tan perfecto?

● Todo el universo a nuestro alrededor se encuentra en equilibrio térmico, como nos muestra el hecho de que la radiación de fondo de microondas es (casi exactamente) igual en todas las direcciones. Pero hay zonas del universo a nuestro alrededor que no pueden haber estado en

contacto en el pasado, ya que están demasiado alejadas unas de otras. ¿Cómo, entonces, "supieron" a qué temperatura tenían que estar?

● Existe una idea muy elegante que explica estos dos últimos problemas pero que, por el momento, sigue siendo una idea y no forma parte del corpus bien establecido del modelo del Big Bang. Es la llamada "inflación cósmica", y consiste en lo siguiente: supongamos que durante una fase extremadamente breve del nacimiento del universo (digamos, aproximadamente, una quintillonésima de segundo cuando el universo tenía aproximadamente esa edad...) la expansión fue enloquecidamente rápida (pongamos que el tamaño del universo se multiplicó por  $10^{25}$  en ese período de tiempo). El efecto neto de esa inflación sería "estirar" el universo para hacer su geometría perfectamente plana, y permitir que las partes que

hoy vemos como muy distantes hubieran estado en realidad muy cercanas anteriormente. Es difícil negar que, visto así, parece poco menos que una locura... pero hay un modelo físico sólido detrás, y esperanzas de que algunas consecuencias de este extraño comportamiento sean observables a corto o medio plazo.

La naturaleza de la materia y la energía oscuras, la asimetría materia-antimateria o la confirmación del modelo inflacionario son algunos de los objetivos de la cosmología para los próximos decenios. En algunos casos hay esperanzas fundadas de encontrar pistas sólidas que seguir, por ejemplo desde la física de partículas (vía aceleradores y/o detectores) o desde la producción de cartografiados cósmicos cada vez mayores y más detallados. En otros seguimos, en realidad, buscando no ya una respuesta, sino incluso una buena formulación de la pregunta.

## DESTACADOS



### ■ ■ ■ CUANDO LOS ASTROS SE ANIMAN: DIVULGACIÓN A TRAVÉS DE DIBUJOS



La Unidad de Comunicación del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) ha desarrollado un proyecto que indaga en la capacidad de la animación para comunicar conceptos científicos. La iniciativa, financiada por la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), ha permitido desarrollar siete piezas con distintas temáticas y estilos de animación que pueden visualizarse en la web [animaciones.iaa.es](http://animaciones.iaa.es)

### ■ ■ ■ CICLO DE DIVULGACIÓN LUCAS LARA

<http://www.divulgacion.iaa.es/ciclo-lucas-lara>

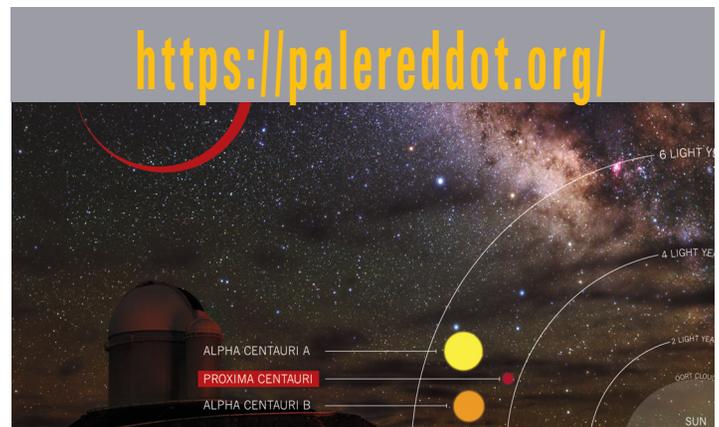
El ciclo Lucas Lara es un ciclo de conferencias de divulgación para todos los públicos que realizamos desde hace años en el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC). Los últimos jueves de cada mes (excepto los meses de verano) el IAA-CSIC abre sus puertas a las 19h para todo aquel que quiera acercarse al mundo de la ciencia.

Las conferencias se graban y están disponibles en la web.



### ■ ■ ■ PALE RED DOT

Pale Red Dot (Pálido Punto Rojo) es una campaña única de divulgación científica, que permitirá al público general seguir el trabajo de investigadores de todo el mundo en su búsqueda de un planeta similar a la Tierra alrededor de la estrella más cercana a nosotros, Próxima Centauri. La campaña de observación tendrá lugar desde enero hasta abril de 2016 y llevará asociado un esfuerzo por comunicar en directo su desarrollo. Además de ofrecer la oportunidad de seguir las observaciones astronómicas, la campaña de divulgación Pálido Punto Rojo permitirá conocer el trabajo científico en los observatorios, que involucra diferentes grupos de astrónomos con distintas especialidades.



### ■ ■ ■ EL RADIOSCOPIO

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

<http://radioscopio.iaa.es>

### ■ CHARLAS DIVULGATIVAS PARA COLEGIOS

El IAA organiza mensualmente charlas de divulgación astronómica para estudiantes, a petición de los colegios interesados. Pueden obtener más información en la página Web del instituto o contactando con Emilio J. García (Tel.: 958 12 13 11; e-mail: [garcia@iaa.es](mailto:garcia@iaa.es)).

