

# INFORMACIÓN Y ACTUALIDAD ASTRONÓMICA

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

JUNIO DE 2014, NÚMERO 43

## CALIFA

*El universo local al descubierto*

REMS: la estación medioambiental española en Marte  
¿Ondas gravitatorias primordiales?

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

# SUMARIO

## REPORTAJES

**CALIFA:** una visión panorámica de las galaxias del universo local...3

**REMS:** la estación medioambiental española en Marte ...7

**CIENCIA EN HISTORIAS...** Paris Pışmiş... 11

**DECONSTRUCCIÓN** Y otros ENSAYOS. ¿Ondas gravitatorias primordiales? ...12

**EL "MOBY DICK" DE...** Mayra Osorio (IAA-CSIC)...14

**ACTUALIDAD** ...15

**SALA LIMPIA** ...21

**CIENCIA: PILARES E INCERTIDUMBRES.** Nebulosas planetarias ...22



## PRESENTACIÓN DE CALIFA Y CARMENES EN EL OBSERVATORIO DE CALAR ALTO

El pasado 11 de junio se presentaron, en la cúpula del telescopio de 3,5 metros del Observatorio de Calar Alto, los proyectos CALIFA (págs. 2 a 7 de esta edición) y CARMENES. Ambos proyectos, con un marcado carácter internacional y liderados desde Granada por investigadores del Instituto de Astrofísica de Andalucía, se integran en la contribución a la comunidad internacional del Observatorio de Calar Alto (CAHA).

El acto contó con la participación de Francisco Triguero, Secretario General de Universidades, Investigación y Tecnología de la Junta de Andalucía; José Manuel Vilchez, director del Instituto de Astrofísica de Andalucía; Jordi Torra, gestor de la Red de Infraestructuras de Astronomía del Ministerio de Economía y Competitividad; Jesús Aceituno, Vicedirector del Observatorio de Calar Alto; Enrique Pérez, investigador del IAA-CSIC e integrante del equipo CALIFA, y Pedro J. Amado, investigador principal del proyecto CARMENES en España.

# CALIFA

## una visión panorámica de las galaxias del universo local

DESARROLLADO DESDE EL OBSERVATORIO DE CALAR ALTO, EL MUESTREO CALIFA CONSTITUYE UN PROYECTO DE REFERENCIA PARA LA PRÓXIMA DÉCADA

Por Sebastián Sánchez  
(IA-UNAM/IAA-CSIC)

BUENA PARTE DEL CONOCIMIENTO QUE HEMOS ADQUIRIDO SOBRE LA ARQUITECTURA DEL UNIVERSO y sus constituyentes proviene de grandes muestreos extragalácticos (2dFGRS, SDSS, VVDS, COSMOS...). Estos estudios no solamente han acotado parámetros como la tasa de formación estelar cósmica (esto es, cuánto gas se transforma en estrellas a lo largo de la evolución del universo), sino que han permitido relacionarlos con las propiedades individuales de las galaxias, como el tipo morfológico (espirales, elípticas, galaxias en colisión...), la masa estelar o la metalicidad (proporción de elementos más pesados que el helio). Comparados con métodos anteriores, los muestreos recientes presentan las siguientes ventajas principales: un alto número de objetos muestreados, del orden de millones, lo que permite un tratamiento estadísticamente significativo a escalas sin precedentes; la posibilidad de construir grandes muestras y sus correspondientes controles para cada tipo de galaxia, lo que permite comparar propiedades por diferentes grupos; un amplio cubrimiento de los

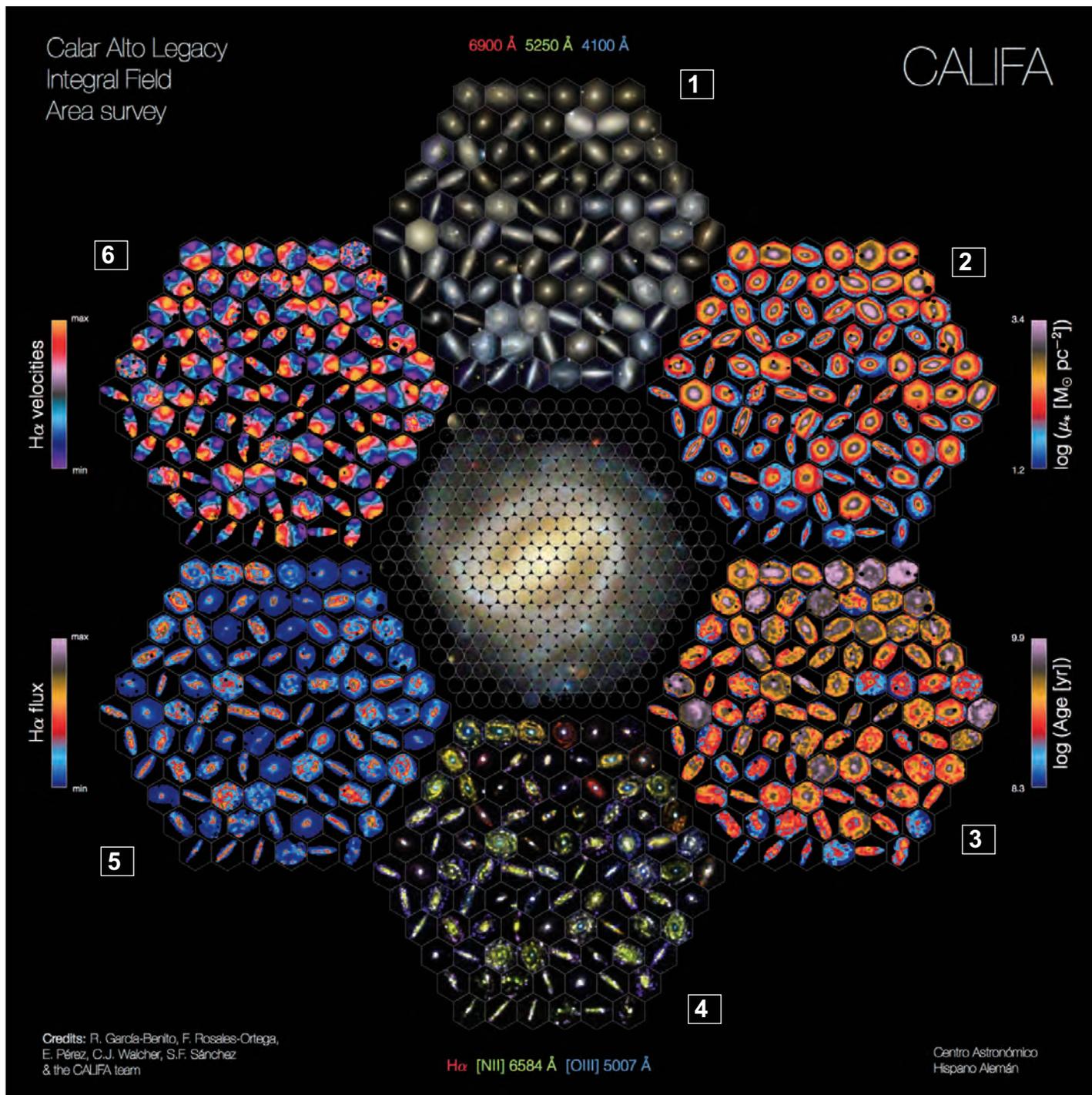
subgrupos de galaxias y sus condiciones ambientales, que permite la obtención de conclusiones universales, independientes de la muestra; y la homogeneidad en el proceso de adquisición de los datos, reducción y análisis, lo que reduce los sesgos debidos a diferentes procesos de observación (lo que solía suceder en observaciones clásicas). Las características de estos proyectos hacen que, más allá de sus objetivos científicos principales, tengan un carácter de legado, siendo de utilidad a un amplio grupo de astrónomos y no solo a los miembros del proyecto que propuso el muestreo.

La tecnología actual permite en general la realización de muestreos en modo imagen, normalmente filtrando la luz en una banda de color determinada, o bien en modo espectroscópico, separando la luz en cada uno de sus colores. Mientras que los muestreos en modo imagen nos proveen de información bidimensional, su información espectral es muy limitada, incluso en el caso de muestreos que cubren gran cantidad de bandas de color (COMBO-17, ALHAMBRA...). Los muestreos espectroscópicos, como SDSS o zCOSMOS, por otra parte, nos proveen de información astrofísica mucho más detallada, pero en general se limitan a un espectro por galaxia, que normalmente no cubre toda su extensión, sino una apertura o región fija (normalmente en el centro). Esto tiene el inconveniente añadido de que la región cubierta es diferente para galaxias a diferentes distancias cosmológicas, lo que implica una dificultad adicional al tratar de comparar los resultados de diferentes objetos a diferentes edades del universo.

Una técnica observacional que combina las

ventajas de ambos modos es la espectroscopía de campo integral (IFS del inglés *Integral Field Spectroscopy*, o espectroscopía 3D). Dicha técnica combina la capacidad de obtener información espacial de las galaxias, tal y como hacen los muestreos con imágenes, e información espectral en cada región muestreada, tal y como hacen los muestreos espectroscópicos. En esencia, esta técnica permite obtener información espectroscópica espacialmente resuelta, y por tanto pone a nuestra disposición una visión panorámica total de las propiedades ópticas de los objetos observados.

Sin embargo, esta técnica no se ha utilizado frecuentemente para la realización de grandes muestreos. Al tratarse de una técnica intrínsecamente más compleja que la imagen directa o la espectroscopía clásica, y al proveer de una cantidad mucho mayor de información de cada uno de los objetos observados, la mayoría de los estudios realizados con la misma se centran en un solo objeto o en un número reducido de estos. Entre las pocas excepciones en las que se ha utilizado en modo muestreo (*survey*) hay que destacar el proyecto SAURON, enfocado al estudio de las regiones centrales de galaxias tempranas y bulbos de espirales, y su extensión, ATLAS3D, o PINGS, que ha realizado grandes mosaicos de galaxias espirales cercanas. Sin embargo, a pesar de las contribuciones significativas que han supuesto, algunos de estos muestreos están afectados por efectos de selección y/o cubrimientos incompletos de toda la extensión de las galaxias observadas. Por ejemplo, ATLAS3D solo observó galaxias elípticas (o tardías), cubriendo solamente las regio-



nes centrales de las galaxias (un total del 20% de su extensión total).

Con el fin de cubrir el hueco existente entre los grandes muestreos en imagen multibanda y/o espectroscópicos de una sola apertura, tales como el SDSS, y los estudios con número de objetos limitado con espectroscopía 3D detallada, iniciamos en 2010 el proyecto CALIFA: *Calar Alto Legacy Integral Field spectroscopy Area survey*. Dicho muestreo propone obtener espectroscopía 3D de unas seiscientas galaxias del universo local (hasta ciento veinte megapársecs), abarcando gran parte de su extensión óptica hasta cubrir el 95% de intensidad de luz, y muestreando completamente la primera octava del rango óptico, desde el ultravioleta cercano al rojo. La muestra “madre” de CALIFA comprende unas mil galaxias

extraídas del muestreo SDSS, seleccionadas por diámetro para que su extensión óptica fuera similar al campo efectivo del instrumento 3D utilizado, PPAK/PMAS, con un campo de visión hexagonal de un minuto de arco cuadrado. Sin más selección que el diámetro, la distancia cosmológica y un corte en luminosidad para excluir las galaxias enanas, cuya evolución es diferente al resto de galaxias, la muestra comprende un subconjunto significativo, estadísticamente bien seleccionado y representativo de todas las galaxias del universo local. Por tanto, incluye galaxias de todos los tipos morfológicos (espirales, espirales tempranas, lenticulares y elípticas), con o sin barras, con evidencias de interacción y/o claramente aisladas, y con todos los tipos de inclinación, desde galaxias completamente de cara hasta pura-

CALIFA permite estudiar las propiedades del gas y de las estrellas, como edad, movimientos, masa o cantidad de metales -elementos más pesados que el hidrógeno y el helio- que presentan. A partir de esos datos, se pueden derivar los trece mil millones de años de historia de cada galaxia y buscar patrones comunes.

En la imagen: 1) imágenes en banda ancha; 2) densidad de masa estelar; 3) edad media de las estrellas; 4) líneas de emisión de diagnóstico; 5) emisión en hidrógeno alfa; 6) cinemática.

mente de canto. Es por tanto la muestra con menos sesgos observada hasta la fecha utilizando la técnica descrita.

A fecha de hoy (abril de 2014), hemos observado un total de 555 galaxias, 421 de ellas incluidas en la muestra descrita inicialmente y 129 más comprendiendo estudios complementarios necesarios para entender la muestra principal (como, por ejemplo, las galaxias compañeras de la galaxias en proceso de colisión o *mergers*, o los estudios

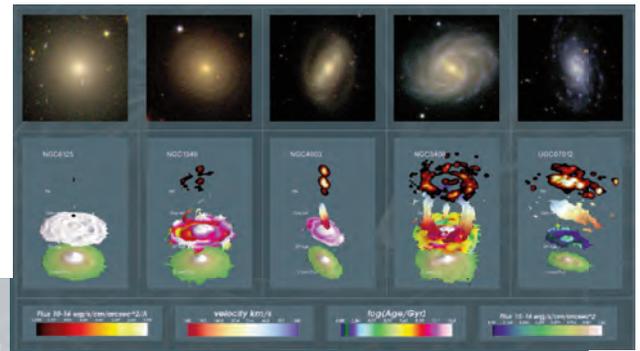
piloto de CALIFA). Los objetos se observan en dos configuraciones, de alta y baja resolución espectral, con el fin de derivar información sobre la cinemática de las poblaciones estelares y el gas -si rota y cómo lo hace-, por una parte, e información de la composición de las poblaciones estelares -su edad, metalicidad, historia de formación estelar...-, y del gas ionizado -fuentes de ionización, características de la misma-. De esta forma se obtienen finalmente unos dos mil espectros independientes de cada una de las galaxias estudiadas. El procesado (reducción, control de calidad, almacenaje y distribución), y análisis científico de los datos está a cargo de una extensa colaboración internacional en la que se integran más de ochenta astrónomos de quince países distintos, con un núcleo más importante en Alemania y España, pero que incluye centros en México, Estados Unidos, Canadá o Australia.

El objetivo final de CALIFA reside en comprender el origen de la diversidad observada en las galaxias y los mecanismos físicos, tanto intrínsecos como ambientales, que son responsables de las diferencias y similitudes observadas en las mismas (imagen dcha). El estudio en detalle de las galaxias más cercanas, tal y como hemos propuesto, nos ayudará a entender las propiedades estructurales que pueden ser interpretadas como los “registros fósiles” de los procesos de formación y evolución. Los primeros años se dedicaron casi por entero a preparar las estrategias de observación y los paquetes de software necesarios para la reducción y el análisis de los datos, y solo recientemente hemos empezado a obtener resultados científicos destinados a alcanzar los objetivos propuestos. Destacamos algunos resultados a continuación.

**Estudios de la historia de formación estelar espacialmente resueltas**

Las galaxias son objetos del universo donde se forman estrellas a partir de gas. Podríamos decir que la vida de una galaxia es un proceso continuo de formación estelar, donde el gas atrapado en los pozos de potencial gravitatorio (de materia oscura), al alcanzar una densidad crítica, colapsa iniciando las reacciones term nucleares que llamamos estrellas. Cada estrella tiene un tipo de vida que es inversamente proporcional a su masa, esto es, las más masivas tienen una vida intensa, luminosa y breve, mientras que las menos masivas tienen una vida más prolongada y menos luminosa. La historia de formación estelar nos cuenta los episodios de la creación de nuevas estrellas a lo largo de las edades cosmológicas. Con

Dcha: en la imagen superior se muestran las imágenes extraídas del muestreo SDSS, con un campo de visión similar al de CALIFA. En el panel inferior se muestra, de abajo a arriba: (i) la distribución de luz en la banda V; (ii) la distribución espacial la edad pesada por luminosidad de la población estelar; (iii) el mapa de velocidad de H $\alpha$  y (iv) la representación 3D de emisión de gas puro (una vez eliminada la contribución de la población subyacente) incluyendo, cuando se detecta, H $\alpha$  y el doblete de [NII], con mayores longitudes de onda hacia arriba.



Para cada galaxia se muestra la misma información dentro del diagrama color-magnitud (debajo), ilustrando cómo las galaxias se vuelven más viejas, con menos gas, y sin presencia de rotación a medida que se hacen más luminosas (izda) y más rojas (arriba). Por el contrario, las galaxias son más jóvenes, con más gas ionizado, y clara rotación a medida que son menos luminosas (dcha) y más azules (abajo).



CALIFA podemos estudiar cómo esta historia cambia en las distintas regiones de las galaxias, en particular desde el centro de las mismas, y por tanto cómo se va moldeando la galaxia a lo largo de su tiempo de vida. Después de intensos estudios técnicos sobre cómo abordar este problema, hemos podido determinar empíricamente que la masa de las estrellas crece desde dentro hacia fuera de las mismas. Igualmente, hemos encontrado que la historia de formación estelar en las galaxias de tipo disco está íntimamente relacionada con su densidad local de masa estelar, mientras que en las galaxias elípticas el parámetro que regula dicha formación estelar es la masa integrada de las galaxias.

**Enriquecimiento químico de las galaxias**

Todos los elementos químicos conocidos, aquellos que conforman la tabla periódica (salvo el hidrógeno y el helio), se forman debido a las reacciones term nucleares que tienen lugar en las estrellas. Dichos procesos de fusión nuclear, altamente energéticos, originan el brillo de las estrellas y dan lugar a elementos más y más pesados a partir del combustible esencial, el hidrógeno (el elemento más abundante en el universo).

Estos elementos formados en las estrellas son expulsados de las mismas en las fases finales de su vida, ya sea de forma “suave”, mediante vientos estelares producidos en estrellas poco masivas (las hermosas nebulosas planetarias), o de forma violenta, mediante las conocidas explosiones de supernovas que son la fase final de la vida de las estrellas muy masivas. En ambos casos cada generación de estrellas “poluciona” con metales (elementos más pesados que el helio) el gas circundante, y la nueva generación de estrellas hereda dicha componente metálica. Esto es, ya no se forman estrellas solo con hidrógeno, sino que hay toda una cascada de elementos más pesados producidos por la población anterior. Debido a que dichos procesos son similares en todas las estrellas, la proporción de los diferentes elementos que se forman es prácticamente constante; así, si se conoce la fracción de uno de estos elementos puede determinarse, en una primera aproximación, la de todos ellos. El parámetro con el que se mide el enriquecimiento químico de un gas o una población estelar dada, inicialmente prístino, formado solamente por hidrógeno (y algo de helio), se conoce

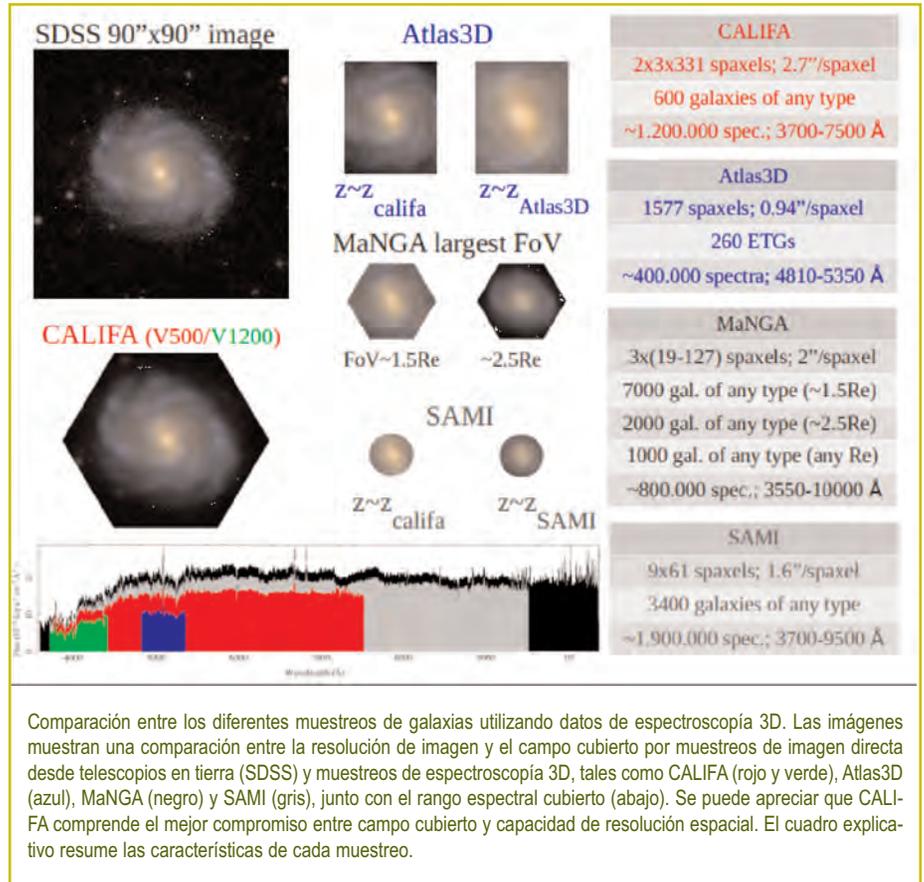
como metalicidad o abundancia química. El estudio de cómo cada generación de estrellas incrementa la metalicidad y su relación con la evolución de las galaxias es de vital importancia si queremos entender cómo se forman todos los elementos que conforman nuestro entorno. De hecho, la abundancia química determina la capacidad de formar planetas extrasolares rocosos (como la tierra), su configuración y, por tanto, su capacidad de albergar vida. Se puede decir que solo en determinadas regiones de determinadas galaxias se podrían formar estrellas con la abundancia necesaria para formar planetas que pudieran ser compatibles con la vida.

Durante los últimos años hemos analizado la abundancia metálica en regiones de alta formación estelar, llamadas regiones HII. Se trata de zonas de las galaxias donde se forman estrellas, que por su masa y luminosidad ionizan (iluminan) el gas circundante, como lámparas fluorescentes, lo que nos permite estudiar la fracción de metales en dicho gas. Hemos desarrollado técnicas para la detección automática y el análisis de dichas regiones HII, calibrando de forma precisa las abundancias de oxígeno en las mismas a partir de los datos observados, y hemos iniciado la exploración de las relaciones de dichas abundancias con las propiedades de las galaxias, tales como la densidad de masa estelar local. De esta manera trazamos una conexión entre la historia de formación estelar y el enriquecimiento químico en distintas zonas de las galaxias.

Recientemente hemos descrito la existencia de un patrón de distribución de las abundancias a lo largo de la distancia desde el centro galáctico que se repite en todas las galaxias observadas, independientemente de su tipo morfológico o del resto de sus propiedades. Dicho patrón universal nos indica que todas las galaxias se enriquecen de metales de la misma forma, lo que delimita de forma muy restrictiva los escenarios propuestos para este tipo de evolución. Hemos hallado el mismo resultado al analizar las abundancias metálicas de las estrellas en estas galaxias, lo que corrobora nuestro resultado anterior.

#### Origen de la ionización de baja intensidad

Igual que las estrellas jóvenes y masivas ionizan el gas circundante, lo que nos ayuda a entender sus propiedades, también se ha descrito una ionización de baja intensidad, entre cien y mil veces menos intensa que la de las regiones HII, que se distribuye de forma difusa a lo largo de las galaxias, sin aparente conexión con formación estelar



reciente. La naturaleza de esta ionización ha sido objeto de debate durante las últimas dos décadas, sin saber a ciencia cierta cuál era la causa dominante. Estudios con datos de CALIFA han mostrado que esta ionización está dominada por un tipo de estrellas viejas, llamadas pos-AGB, que pueden ionizar el gas de forma poco intensa durante un corto periodo de vida. Estas estrellas se encuentran distribuidas de forma homogénea por todas las galaxias, y son más numerosas en las galaxias viejas, o elípticas. A pesar de ello, una fracción de estas regiones ionizadas debe de tener un origen diferente, muy probablemente un núcleo activo de baja intensidad (relacionado con un agujero negro central), que no es capaz de producir ionizaciones intensas debido a que parte de luz ionizante se pierde.

#### Propiedades cinemáticas de las galaxias

Los datos del proyecto CALIFA nos han permitido estudiar los patrones cinemáticos del gas ionizado y su relación tanto con la presencia de barras centrales como con procesos de colisión y fusión entre galaxias. Hemos podido explorar el momento angular (o impulso de la rotación) de las galaxias con respecto a otras propiedades de las mismas, e igualmente comparar la cantidad de masa total (estrellas, gas y materia oscura) con respecto a la masa estelar que medimos. Estos estudios nos permitirán comprender cómo el hecho de que las galaxias roten en discos ordenados

(galaxias espirales clásicas) o presenten movimientos en órbitas tridimensionales (galaxias elípticas) puede influir tanto en su historia de formación estelar como en su enriquecimiento químico.

Como proyecto de legado, y atendiendo a la responsabilidad por el número de noches de observación destinadas al mismo, CALIFA está cumpliendo en plazo con su compromiso de distribución de datos. La primera distribución pública de datos, que tuvo lugar en noviembre 2012, puso a disposición de toda la comunidad científica los datos correspondientes a las primeras cien galaxias (doscientos cubos de datos o cuatrocientos mil espectros), con el control de calidad garantizado. Estos datos pueden descargarse de la página web: <http://califa.caha.es/DR1>. Hasta la fecha se han realizado más de siete mil descargas, y ya se han producido resultados científicos fuera de la colaboración CALIFA. La próxima distribución de datos se realizará después del verano de 2014 y comprenderá al menos doscientas galaxias (cuatrocientos cubos u ochocientos mil espectros), una cifra muy similar a las distribuidas por el proyecto SDSS.

Por todo ello CALIFA se configura como el referente internacional para la próxima generación de muestreos extragalácticos que harán uso de la espectroscopía de campo integral o 3D, tales como MaNGA o SAMI, así como aquellos que se iniciarán en los próximos años con instrumentos de última generación, tales como MUSE@VLT.

# REMS: La estación medioambiental española en Marte

Por F. Javier Martín Torres (IACT, CSIC-UGR), María Paz Zorzano y Juan Francisco Buenestado (CAB, CSIC-INTA)

El Grupo de Ciencias Planetarias y Habitabilidad del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC/UGR) forma parte del equipo responsable de la explotación científica de los datos de REMS (*Rover Environmental Monitoring Station*), a partir de los que desarrolla varias líneas de investigación centradas en el estudio de diferentes aspectos de la atmósfera de Marte

**LA ATMÓSFERA, A PESAR DE SER UNA CAPA DELGADA Y RELATIVAMENTE LIVIANA** respecto al resto de los elementos constituyentes de los planetas, es quizá el factor más importante en cuanto a la configuración de sus condiciones ambientales. Constituye la envoltura que media la interacción entre la energía procedente de la estrella central y su superficie, gran parte de la cual impulsa los procesos físicos y fotoquímicos definidores de dichas condiciones. Además, su carácter fluido hace que en su seno se produzca una amplia variedad de procesos físicos y químicos manifestados en una constante redistribución de compuestos atmosféricos y una cambiante variedad de complejas configuraciones en las que se ajusta el balance global de energía.

Por otra parte, la composición de la atmósfera de un planeta en un momento de su historia es el resultado de la interacción entre los materiales primigenios que se agregaron para formarlo y su evolución geoquímica (geobioquímica en el caso de la Tierra), dinámica y fotoquímica posterior, evolución que puede ser reconstruida hacia el pasado ofreciendo también una perspectiva histórica de enorme interés científico. Conocer la atmósfera es, por todo ello, crucial en el desarrollo de los estudios planetológicos. Pero además, y desde un punto de vista de la astrobiología, la atmósfera, como capa exterior observable, resulta clave a la hora de plantear cualquier investigación enmarcada en esta disciplina: se trata de uno de los factores de habitabilidad más determinantes de

cualquier cuerpo y, además, constituye el ámbito en el que se podría rastrear la existencia de cualquier biosfera (superficial o no) gracias a su condición de vertedero necesario y último de ciertos desechos metabólicos. La misión *Mars Science Laboratory* (MSL), actualmente operando en Marte a través del vehículo *Curiosity*, tiene como objetivo básico evaluar el potencial de habitabilidad, pasada y presente, de la zona de estudio, el cráter de impacto Gale. Situado cerca del ecuador marciano, este cráter ha sido seleccionado como área de aterrizaje por mostrar, entre otras cosas, inequívocas evidencias, tanto morfológicas como mineralógicas, de que en el pasado contuvo agua líquida en abundancia, un requisito considerado

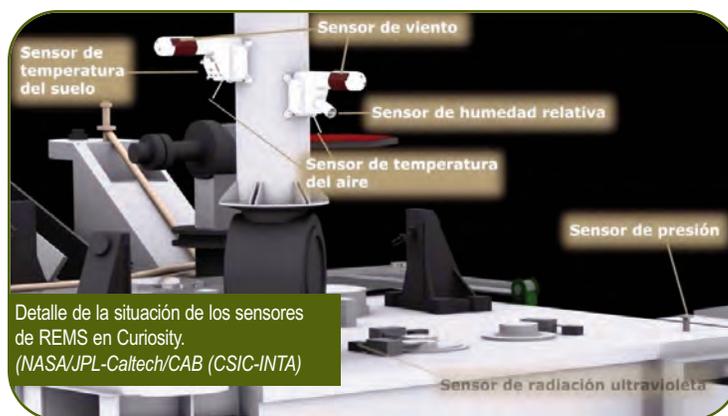
fiñola compuesta por seis sensores que miden la temperatura del aire (ATS) y del suelo (GTS), la presión atmosférica (PS), la velocidad y dirección del viento (WS), la humedad relativa del aire (HS) y la radiación ultravioleta incidente (UVS), todos ellos nombrados por sus siglas en inglés. Las medidas del sensor ultravioleta son muy útiles para definir procesos fotoquímicos en la atmósfera marciana, y por supuesto para estimar la habitabilidad superficial de Marte, pero además contribuirán a establecer una valoración preliminar de la posibilidad de plantear el envío futuro de misiones tripuladas, que se afrontará más decididamente en la próxima misión que la NASA tiene previsto lanzar en 2020 como continuación de su ambicioso Plan de Exploración de Marte.

Todos los sensores de REMS miden, de forma simultánea, diaria y autónoma, al menos durante cinco minutos de cada hora. A esto se suman una o varias horas de medida continua adicional que pueden ser fijadas libremente en función de los intereses científicos que se planteen en cada momento. Desde la llegada de *Curiosity* a la superficie de Marte en agosto de 2012, los sensores de

REMS han estado recabando datos

que contribuirán decisivamente a profundizar en el conocimiento de la meteorología y climatología marcianas y a determinar la habitabilidad del planeta.

Sin embargo, y sobre el enorme esfuerzo tecnológico que supone enviar un vehículo como *Curiosity* hasta la superficie de otro planeta, su mera puesta en funcionamiento una vez allí no supone más que un primer paso hacia los objetivos mencionados, puesto



Detalle de la situación de los sensores de REMS en *Curiosity*. (NASA/JPL-Caltech/CAB (CSIC-INTA))

imprescindible en cualquier entorno que merezca ser incluido en la categoría de habitable. La misión analiza también los procesos planetarios relevantes para la habitabilidad del planeta y su evolución histórica, entre los que la dinámica atmosférica juega un papel muy importante. Para conseguirlo, *Curiosity* cuenta entre sus instrumentos con REMS (*Rover Environmental Monitoring Station*), una estación meteorológica espa-

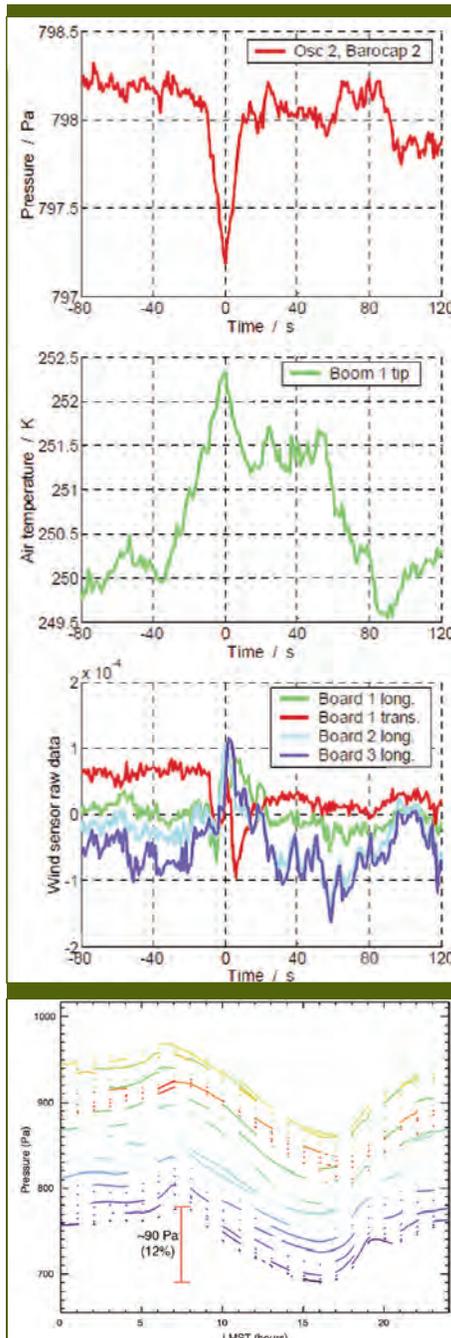
que la utilidad de los datos crudos que empieza a recabar no es directa y, como veremos más adelante, requiere un concienzudo análisis en función de una larga serie de factores. Estos factores vienen impuestos en gran medida por la propia situación del instrumento sobre una base móvil y caliente que introduce perturbaciones en las medidas, haciendo necesario un trabajo de interpretación previo a su validación inequívoca y a su posterior explotación científica. El diseño de algoritmos y protocolos de tratamiento de datos es una tarea básica y cotidiana de las investigaciones propiciadas en torno a REMS (así como al resto de instrumentos con los que está equipado Curiosity). La movilidad del Curiosity y su disponibilidad operacional hacen que el trabajo de programación diaria de medidas sea igualmente un trabajo delicado, teniendo en cuenta además la necesidad de coordinarlas con las del resto de la instrumentación para aprovechar de forma óptima todas las posibilidades que ofrece.

#### Avance en la exploración marciana

REMS presenta una serie de innovadoras características respecto de otros instrumentos anteriormente utilizados para caracterizar el entorno marciano que suponen sin duda algunas decisivas ventajas, pero que no dejan de presentar también ciertos inconvenientes con los que el equipo de investigación encargado de sus operaciones y de la explotación de sus datos debe enfrentarse a diario. De entrada, está montado en una plataforma móvil, lo que posibilita la monitorización de la evolución diurna de variables ambientales en los diferentes lugares por los que transita el vehículo que, a diferencia de lo habitual en otras misiones anteriores equipadas con instrumentos meteorológicos, presentan una notable variabilidad topográfica. Además, es capaz de realizar observaciones simultáneas y rutinarias a través de todos sus sensores, lo que permite una interpretación coherente de los procesos que tienen lugar en la capa límite atmosférica (la capa inferior de la atmósfera en interacción directa con el suelo). En el tiempo transcurrido desde su puesta en funcionamiento y gracias a estas peculiares características, REMS ha proporcionado interesantes hallazgos que abren nuevas vías a seguir en posteriores estudios de la atmósfera marciana. Resulta destacable que la medida de radiación ultravioleta que realiza es el primer registro in situ de la radiación incidente sobre la superficie de otro planeta.

#### Algunos resultados de REMS

Las mediciones del sensor de presión (PS)



Arriba: comportamiento de los valores de presión, temperatura y velocidad y dirección del viento tomadas durante un vórtice convectivo. Fuente: NASA/JPL-Caltech/CAB (CSIC-INTA)/FMI/Ashima Research. Debajo: variación de la presión a lo largo del día cada diez soles\* desde sol diez (violeta oscuro) hasta sol doscientos sesenta (rojo) con referencia a la oscilación mencionada. NASA/JPL-Caltech/CAB (CSIC-INTA). \*Sol: día en Marte (24h 37 min). \*\*Grados centígrados = kelvin -273

permiten observar ciclos de variación en diversas escalas temporales: anuales, estacionales y diarios. REMS ha medido una oscilación de hasta un 12% en torno a la media diaria, una variación debida a la topografía y sensiblemente mayor que la registrada por instrumentos en misiones anteriores. En escalas temporales aún menores se han registrado caídas de presión de entre diez y veinte segundos, más frecuentes en torno al mediodía y acompañadas de eleva-

ciones de temperatura y cambios en la velocidad y dirección del viento que corresponden a vórtices convectivos. Durante los mismos no se aprecia habitualmente disminución en los valores de radiación ultravioleta, por lo que se deduce que son demasiado débiles para levantar cantidades significativas de polvo, cuya presencia produciría un oscurecimiento momentáneo apreciable por el sensor ultravioleta. No se trata por lo tanto de los típicos remolinos de polvo (*dust devils*) que se aprecian en otras localizaciones y que han sido extensamente registrados. La larga duración de la misión, al menos un año marciano (dos años terrestres), permite además establecer un patrón estacional de la incidencia de estos remolinos, que de momento se ha mostrado decreciente en el paso del verano al invierno.

Las medidas de presión obtenidas hasta el momento son consistentes con el ciclo del CO<sub>2</sub> animado por la sublimación y condensación de los casquetes polares, y han permitido constatar, en comparación con las obtenidas por las sondas *Viking 1* y *Viking 2*, una llegada más temprana del invierno y una duración menor de este en el hemisferio norte. Se ha registrado además una notoria oscilación en los valores de presión media que se atribuye a inestabilidad en las células de Hadley, extremo que requerirá una especial atención científica.

Con los datos de humedad relativa facilitados por el sensor HS se ha tratado de establecer la pauta del ciclo hidrológico marciano, en periodo diurno y estacional, mediante el cálculo de la relación de mezcla en la atmósfera a partir de la temperatura del aire registrada por el sensor de temperatura del aire (ATS). Suponiendo una atmósfera de composición homogénea, se ha utilizado la relación de mezcla para estimar la abundancia de vapor de agua en la columna de aire, obteniéndose unos valores más altos que los adelantados por otros instrumentos anteriores como *Thermal Emission Spectrometer* (TES, a bordo de *Mars Global Surveyor*) y *Mini-TES* (montado en los *Mars Exploration Rovers*). No obstante, el cálculo de la cantidad de agua que debe ser absorbida en la superficie a partir de los datos de humedad relativa recabados por REMS sí cuadra con los valores deducidos de las medidas de otros instrumentos del propio Curiosity, lo que apunta a una mejor adecuación de los datos de REMS relativos a este parámetro.

Se ha caracterizado el flujo hidrostático de ajuste que se genera como consecuencia de las variaciones diarias de temperatura y su desfase con los máximos y mínimos de presión atmosférica (se observa un lapso de aproximadamente una hora y media entre

el máximo y mínimo de presión y la salida y puesta del sol). Este flujo, influenciado de nuevo por la orografía del lugar, se manifiesta en movimientos cíclicos de masas de aire hacia y desde el interior del cráter, y amplifica las oscilaciones de las mareas termales haciendo que las variaciones sean más acusadas que en topografías menos irregulares.

Los datos son tratados en relación con diversos modelos atmosféricos de circulación general y mesoescala (escalas medias) para perfeccionar el conocimiento de la dinámica físico química de las atmósferas en general, tanto a escala global como regional, que permitirán además avanzar en el conocimiento de nuestra propia atmósfera y de su evolución. La comparación con simulaciones es de la mayor importancia considerando que la interpretación de las medidas de un instrumento como REMS está inevitablemente dificultada por la carencia de un contexto espacial de referencia. Los resultados de las

simulaciones, una vez validados y contrastados con las observaciones, proporcionan ese contexto interpretativo para un análisis más esclarecedor. Los modelos mesoescala preveían la existencia de vientos catabáticos (que descienden hacia el seno de la atmósfera) asociados a las pendientes del cráter y de su monte central, el monte Sharp, que han resultado coherentes con los fenómenos descritos a partir de las mediciones de REMS, en las que además parece observarse la existencia de dos masas de aire diferenciadas en el fondo del cráter y en el altiplano con dinámicas independientes. La confirmación de este fenómeno es una línea de investigación de especial trascendencia por sus implicaciones para el estudio del ciclo del agua en el interior del cráter.

Complementariamente, los resultados obtenidos en la exploración de la atmósfera de Marte a través de REMS contribuirán al desarrollo de modelos fotoquímicos y de transferencia radiativa que propiciarán una mejor

interpretación de los espectros de planetas extrasolares registrados en lo sucesivo con los nuevos instrumentos de detección remota.

En el aspecto operacional, REMS ha observado fluctuaciones térmicas nocturnas correlacionadas con caídas de presión y viento que son muy significativas para ponderar en lo sucesivo valores de temperatura del suelo obtenidas desde orbitadores, y ha registrado con precisión el contraste térmico que se produce entre las zonas iluminadas y en sombra en la propia plataforma, permitiendo estimar la contaminación térmica que provoca en el aire a su alrededor. La identificación y caracterización de este efecto será clave en el diseño de futuras misiones y en la correcta valoración de sus datos, así como en el tratamiento de los recabados hasta ahora por otras sondas.

En este sentido, cabe destacar otra de las peculiaridades de Curiosity, que además de ser una plataforma móvil está notablemente

## CURIOSITY/REMS: IMPLICACIONES EN LA HABITABILIDAD

A través de REMS y del resto de los instrumentos montados en Curiosity se ha esbozado un cuadro del entorno en la zona estudiada para definir su potencial de habitabilidad (HP) desde una perspectiva histórica. Para ello se han analizado los datos obtenidos en relación a los requerimientos medioambientales necesarios para el sostén de la vida bacteriana conocida, la única referencia disponible.

Desde un punto de vista químico, se ha encontrado que los materiales de la superficie incluyen en su composición todos los elementos utilizados por la vida, es decir, carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre, así como los denominados oligoelementos: magnesio, hierro, silicio, cloro litio y bromo. El instrumento SAM (*Sample Analysis at Mars*), un laboratorio para analizar los componentes químicos de muestras de suelo y atmósfera, ha detectado además en las muestras de roca analizadas volátiles como H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, HCl y NO, que son metabólicamente provechosos y configuran unas condiciones redox (reducción-oxidación) más confortables para la vida que las de la superficie. El instrumento DAN (*Dinamyc Albedo of Neutrons*), que hace una prospección del suelo hasta sesenta centímetros de profundidad, ha registrado datos de la presencia de agua en una cantidad de entre el 2% y el 3% en peso, aunque la temperatura no permite su permanencia líquida en la superficie, y los datos de REMS arrojan una baja humedad atmosférica, por lo que no hay constancia de que se produzca un intercambio significativo de agua entre el suelo y la atmósfera. Los características físicas del entorno (temperatura, porosidad y permeabilidad de los materiales, radiación ionizante incidente, flujo de luz solar etc), sin embargo, han resul-



tado más inhóspitas. Las condiciones térmicas son hostiles tanto por sus valores como por la amplia oscilación de estos (entre -85°C y en torno a 0°C), cuando el mínimo que puede soportar el más resistente de los organismos conocidos es de -18°C. La radiación ionizante incidente sobre la superficie medida por el *Radiation Assessment Detector* (RAD), que detecta rayos cósmicos y partículas energéticas procedentes del Sol, adquiere unos valores medios de setenta y seis miligrays por año, que también excede la tolerancia de los organismos mejor adaptados a este factor.

Todo esto hace que la superficie marciana del interior del cráter Gale, si bien tuvo probablemente un alto potencial de habitabilidad cuando el agua corría sobre ella al calor de una atmósfera densa, sea en la actualidad un entorno poco adecuado para albergar vida, al menos vida como la que se conoce en la Tierra. No obstante, cabe señalar que las condiciones subsuperficiales todavía podrían ofrecer un panorama algo más propicio, como sería el caso de ciertos tipos de rocas oscuras que podrían alcanzar temperaturas decenas de grados más altas que las de la superficie. Por supuesto, este análisis no puede llevar a excluir taxativamente la posibilidad de que exista vida adaptada a algunos entornos marcianos, pero es en cambio útil de forma inmediata para ponderar el riesgo, que se muestra cierto, de que se pueda producir algún tipo de contaminación biológica con organismos terrestres aportados en posteriores misiones de exploración.

IEvolución figurada de Marte desde un pasado húmedo (D. Ballard).

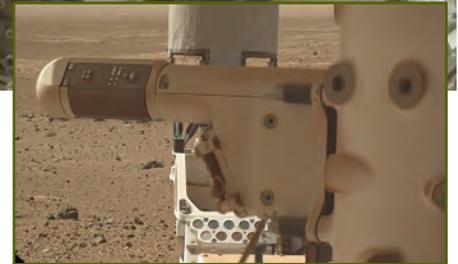
caliente respecto a su entorno. Esto se debe al generador térmico de radioisótopos (RTG) que le sirve de fuente de energía y que eleva la temperatura del vehículo doscientos grados centígrados por encima de la media ambiental y lo convierte en el punto más caliente sobre la superficie de Marte. El RTG eleva la temperatura tanto del aire en contacto con él como del suelo a su alrededor, donde los sensores correspondientes toman sus medidas; además, esta enorme plataforma metálica absorbe la radiación del Sol y se sobrecalienta, induciendo la forma-

*Cuando la misión nominal de MSL se dé por finalizada, REMS habrá proporcionado a la comunidad científica el más extenso volumen de datos ambientales de Marte recabados hasta ahora*

ción de una película de aire caliente que envuelve al Curiosity y que afecta a las medidas de los sensores de temperatura.

Por otro lado, el propio calentamiento inducido por el funcionamiento de la electrónica de los instrumentos en las gélidas noches marcianas, con temperaturas de menos de sesenta grados bajo cero, también induce perturbaciones térmicas que alteran, entre otras, las medidas crudas del sensor de humedad relativa. Estos son algunos ejemplos de artefactos inducidos por la propia instrumentación y la plataforma que deben corregirse. En el caso del sensor de temperatura del aire esta distorsión es crítica, puesto que opera desde el interior del volumen de aire calentado por el propio vehículo; para asegurar que sus medidas reflejan realmente la temperatura de la atmósfera marciana, ha sido necesario diseñar un modelo de su comportamiento térmico y un protocolo específico para calibrar las lecturas obtenidas, discernir los momentos en que cada parte del vehículo está expuesto al Sol o en sombra y discriminar los valores debidos a la contaminación provocada por el calor del vehículo.

En cuanto a la temperatura del suelo, también hay que desestimar la aportación térmica de Curiosity, que evidentemente aumenta con el tiempo cuando está parado operando en un determinado lugar, aunque en este caso la contaminación tiene un aspecto provechoso porque, contrastada con las medidas que se toman cuando el vehículo se mueve, ayuda a estimar cómo de rápido se eleva su temperatura bajo una fuente de calor, un dato valioso para iden-



Fotografías de los dos "booms" de REMS tomadas por Curiosity en sol 526. Debajo: estado de los fotodiodos en sol 526. Se puede apreciar el efecto de los imanes en la prevención contra la deposición de polvo. Fuente: NASA/JPL-Caltech/MSSS.



tificar los materiales que lo componen. Para la correcta interpretación de las medidas de este sensor hay que manejar además información adicional sobre el tamaño y la orientación de los elementos dispuestos sobre el terreno delante del campo de medición del sensor.

Las lecturas del sensor ultravioleta, situado en la plataforma superior del vehículo, no se ven afectadas por el calor, pero presentan sus propios problemas particulares derivados de la movilidad de la plataforma y de la meteorología marciana. Así, deben ponderarse no solo en relación a la posición del Sol, sino que están mediatizadas por la presencia de polvo en suspensión (opacidad de la atmósfera), que además se va depositando sobre los fotodiodos que lo integran. Esta deposición se ha minimizado con el montaje alrededor de cada uno de ellos de un anillo imantado que atrae el polvo en su caída, dado que está compuesto en gran medida de partículas de hierro magnéticas. Pero esta precaución solo sirve como paliativo, y cierta cantidad acaba sobre los fotodiodos, imponiendo una continua calibración de los datos que registra

en función de su estado, deducido otra vez de las imágenes tomadas por las cámaras. Estas, por otro lado, van montadas en el extremo superior de un mástil vertical, que en ciertas orientaciones puede proyectar sombra sobre los fotodiodos desvirtuando sus medidas, y también hay que conocer en todo momento la posición del vehículo, puesto que la inclinación que puede tomar al disponerse sobre algunas irregularidades del terreno cambia el ángulo de incidencia de la radiación y por tanto su valor.

Después de su validación, los datos que recaba REMS pasan a engrosar los registros públicos del Planetary Data System de la NASA para su consulta por cualquier equipo científico que los requiera.

En junio de 2014, cuando la misión nominal de MSL se dé por finalizada (quedando abierta la posibilidad de ampliar su periodo de operatividad), REMS habrá proporcionado a la comunidad científica el más extenso volumen de datos ambientales de Marte recabados hasta ahora. Además, las tareas científicas realizadas en torno a su tratamiento supondrán un avance en la caracterización más precisa de la atmósfera, radiación y geología marcianas y sentarán una serie de criterios de obligada referencia en el diseño y operación de otros instrumentos en futuras misiones, aparte de haber contribuido decisivamente al logro de los objetivos inicialmente planteados.

*Gracias a Patricia Valentín Serrano por la lectura del texto y comentarios.*

Paris Pişmiş

# Madre de la astronomía mexicana

POR SILVIA TORRES-PEIMBERT (UNAM)  
 Y JOSEFA MASEGOSA (IAA)

Paris Pişmiş nació en Turquía en 1911 en una familia acomodada y se convirtió en una de las primeras mujeres licenciadas por la Universidad de Estambul (Turquía). Estudió en la Academia Americana de Mujeres en Uskudar y se graduó en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Estambul. Obtuvo en 1937 el grado de doctora en Matemáticas con una tesis sobre la rotación de nuestra galaxia dirigida por los profesores R. Von Mises y Erwin Finley-Freundlich. Durante su estancia en la universidad trabajó como ayudante en el observatorio de la universidad, ejerciendo como traductora e intérprete al turco del francés, alemán e inglés.

Debido a la excelente labor realizada como ayudante de investigación, el profesor Freundlich se convirtió en su mentor y la recomendó al profesor Shapley para obtener una beca en la Universidad de Harvard. Antes del comienzo de la segunda Guerra Mundial trabajó como astrónoma ayudante en el *Harvard College Observatory* (HCO), entre 1939 y 1942. En el HCO encontró un entorno muy estimulante como científica de la mano de eminentes astrónomos como Harlow Shapley, Cecilia Payne-Gaposchkin, Bart Bok, Donald Menzel, Fred Whipple y de los múltiples visitantes que recibía el observatorio. En 1942 se casó con Félix Recillas, un estudiante de astronomía mexicano y se trasladó con él al recién inaugurado Observatorio Astrofísico de Tonantzintla en Puebla, y allí trabajó hasta 1946. Entre 1946 y 1948 realizó varias estancias temporales en las Universidad de Princeton y en el Observatorio de Yerkes en Estados Unidos. En 1948 se trasladó a la Ciudad de México para trabajar en el Observatorio Astronómico Nacional en Tacubaya, adscrito a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Paris trabajó más de cincuenta años en el Instituto de Astronomía de la UNAM hasta su muerte en 1999.

## Maestra de astrónomos

La UNAM le reconoció su trabajo concediéndole el honor de un doctorado Honoris Causa por dicha universidad. A partir de 1955, Paris comenzó a impartir los primeros cursos reglados de astronomía en México,



convirtiéndose en maestra y fuente de inspiración para los primeros astrónomos profesionales mexicanos. Entre ellos cabe destacar figuras tan reconocidas como Arcadio Poveda, Eugenio Mendoza, Enrique Chavira, Deborah Dultzin, Alfonso Serrano, Alejandro Ruelas o Marco Moreno. Por su contribución como maestra de jóvenes astrónomos se le otorgó el premio de Enseñanza de la Ciencia de la UNAM. Una de las características destacables de Paris fue su interés constante por nuevos retos y desarrollos técnicos pioneros, lo que la convirtió en un modelo a imitar por sus colegas, influyendo muy positivamente en las estudiantes jóvenes mexicanas. Como resultado de ello, del centenar de astrónomos trabajando en la actualidad en el Instituto un 25% son mujeres.

## La estructura de las galaxias

La Dra. Paris Pişmiş publicó más de ciento veinte artículos sobre diferentes temas de astrofísica, aunque su principal campo de interés fue la estructura galáctica. Entre sus contribuciones más relevantes cabe destacar el descubrimiento de tres cúmulos globulares y veinte cúmulos abiertos. También estudió el efecto de la absorción interestelar de las asociaciones estelares sobre la distribución a gran escala de las estrellas en la galaxia. Ella contribuyó, con sus estudios de poblaciones estelares, a explicar el origen de la estructura espiral de las galaxias mediante ondas de densidad. En 1972, Pişmiş introdujo los métodos interferométricos Fabry-Perot en México para poder realizar estudios de cam-

pos de velocidad de nebulosas galácticas. Durante los últimos años de su trayectoria investigadora Pişmiş analizó algunas nebulosas, con el uso de la técnica Fabry-Perot y datos del Observatorio Astronómico Nacional en Tonantzintla y en San Pedro Mártir, estudiando la morfología y cinemática de galaxias con actividad nuclear.

Paris fue muy activa contribuyendo a la edición de publicaciones astronómicas actuando como editora en los tres volúmenes del Catálogo Astrofotométrico de Tacubaya en 1966 y del Coloquio 33 de la IAU *Observational Parameters and Dynamical Evolution of Multiple Stars* en 1975. Hay que destacar como su contribución principal promover la publicación de revistas mexicanas de astronomía. Entre 1966 y 1973 ella fue editora del Boletín de los Observatorios de Tonantzintla y Tacubaya y por veinte años de la Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica. Pişmiş fue también muy activa en organizaciones profesionales tales como la *American Astronomical Society*, la *Royal Astronomical Society*, la Academia Mexicana de Ciencias, la Sociedad Mexicana de Física, y la Unión Astronómica Internacional, donde perteneció a las Comisiones de Galaxias, de Estructura y Dinámica de los Sistemas Galácticos y de Medio Interestelar.

Paris será recordada no solo por los astrónomos mexicanos sino también por los colaboradores que tuvo por todo el mundo. Sus memorias fueron publicadas en 1998 con el título *Reminiscences in the Life of Paris Pişmiş: a Woman Astronomer*.

# ¿ONDAS GRAVITATORIAS PRIMORDIALES?

RECIENTES OBSERVACIONES SEÑALAN LA EXISTENCIA DE ESTRUCTURAS ROTACIONALES EN LA MEJOR FOTOGRAFÍA DEL UNIVERSO TEMPRANO QUE POSEEMOS: EL FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS. ESTE HALLAZGO PODRÍA IMPLICAR LA EXISTENCIA DE ONDULACIONES DEL ESPACIOTIEMPO EN LOS PRIMEROS INSTANTES DEL UNIVERSO, OFRECIENDO UNA EXCITANTE POSIBILIDAD DE MEJORAR NUESTRA COMPRENSIÓN DE LOS FENÓMENOS QUE TUVIERON LUGAR JUSTO DESPUÉS DEL MISMO BIG BANG. PRESENTAMOS LA DECONSTRUCCIÓN DE ESTE DESCUBRIMIENTO ENMARCADO EN EL CAMPO DE LA COSMOLOGÍA.

## 1 LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL

Puede afirmarse que la cosmología es una disciplina antigua. El ser humano ha intentado comprender el orden del universo y el lugar que ocupa en él desde tiempos inmemoriales. Sin embargo, lo que conocemos hoy en día como cosmología no podría entenderse sino en relación con la teoría de la relatividad general. La teoría de la relatividad general desbancó en el siglo XX a la teoría de la gravitación de Newton como la descripción más precisa conocida de los fenómenos gravitatorios. Además, revolucionó nuestra visión de conceptos fundamentales como son el espacio y el tiempo, otorgando una nueva dimensión al uso de la geometría en teorías físicas.

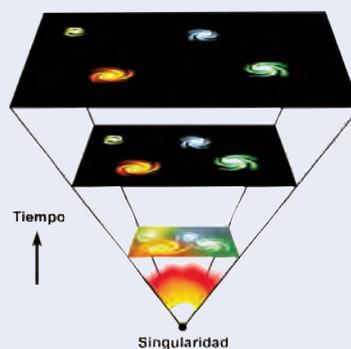


## 2 LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO Y SU COMIENZO

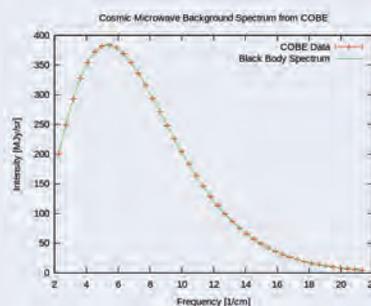
La conjunción de la teoría de la relatividad general y el principio cosmológico (que supone que el universo es homogéneo e isótropo a escalas cosmológicas) permite construir un modelo matemático del universo a gran escala que presenta una característica sorprendente. En general, el universo de este modelo se expande espacialmente, es decir, el volumen que ocupa aumenta con el tiempo. Este resultado fue obtenido de forma independiente por Alexander Friedmann en 1922 y Georges Lemaître en 1927. Este último halló a su vez lo que hoy se conoce como ley de Hubble. Esta nominación se debe a Edwin Hubble quien, en 1929, propuso la primera verificación experimental de esta relación. Dicha ley dictamina que el cociente entre la velocidad de las galaxias cercanas y su distancia debe ser igual a una constante, que también recibe el nombre de Hubble. La evidencia experimental acumulada desde entonces en favor de esta ley se ve hoy día como una fuerte garantía de la veracidad de la expansión del universo. Si la idea de la expansión del universo es sorprendente en sí misma aún lo es más, si cabe, la consecuencia que tiene su inverso temporal. Al rebobinar la historia del universo se obtiene la conclusión de que esta expansión ha debido originarse en un punto singular. Este punto singular recibe el nombre de Big Bang (gran explosión, en inglés).

## 3 UNA FOTOGRAFÍA DEL UNIVERSO TEMPRANO

De haber existido, el Big Bang tuvo que ser un evento altamente energético. La expansión posterior habría causado una disminución gradual de las altas temperaturas iniciales. En la visión estándar, el universo primigenio está formado por un plasma de electrones, fotones y bariones. Este enfriamiento progresivo está repleto de hitos relacionados con la combinación de esos ingredientes para dar lugar a la variedad de elementos químicos que pueblan el universo actual (nucleosíntesis) y transiciones de fase. Una de las predicciones robustas de este proceso de enfriamiento, señalada en 1948 por George Gamow, Ralph Alpher y Robert Hermann, es la presencia de un mar de fotones que debería poblar el universo en el presente. La razón de la existencia de este mar de fotones puede trazarse al desacoplamiento entre materia (electrones y bariones) y radiación electromagnética (fotones), que tuvo lugar cuando la temperatura del plasma era de unos tres mil grados Kelvin, y que permite a los fotones liberarse del plasma y viajar libremente por el universo. La detección de estos fotones en la actualidad sería, por tanto, lo más parecido a una fotografía del universo temprano que podríamos obtener. La existencia de este mar de fotones fue corroborada en 1965 por Arno Penzias y Robert W. Wilson. Ambos recibieron el Premio Nobel de Física en 1978 por este descubrimiento. Este fondo cósmico de microondas, como se conoce en la actualidad (CMB, de sus siglas en inglés), presenta un espectro de cuerpo negro con temperatura de unos 2,7 grados Kelvin y es extremadamente isótropo.



Arriba: concepción artística de la expansión del universo. Debajo, espectro del fondo cósmico de microondas obtenido por COBE (NASA).

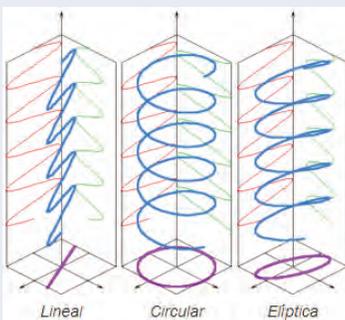


## 4 INHOMOGENEIDADES:

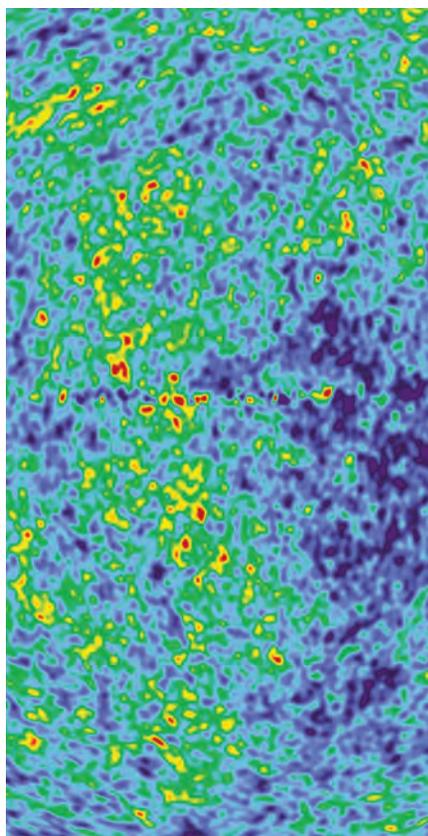
Aunque el universo sea homogéneo e isótropo a distancias cosmológicas, también es cierto que, en escalas menores, posee una rica estructura ampliamente estudiada por la astrofísica: supercúmulos, cúmulos de galaxias y un largo etcétera. Uno de los desafíos de la cosmología reside en explicar la generación de estas estructuras en el proceso de expansión del universo desde el Big Bang hasta el presente. La idea más extendida hoy en día es que estas estructuras se generaron mediante la amplificación de pequeñas inhomogeneidades presentes en el universo primigenio en un proceso de inflación. La inflación es una expansión acelerada del universo que tuvo lugar, hipotéticamente, en los primeros instantes tras el Big Bang. Este proceso de expansión acelerada produce un patrón característico de inhomogeneidades que debería ser patente en el CMB. En efecto, la existencia de estas minúsculas inhomogeneidades (del orden de cien microkelvin) fue puesta de manifiesto por la misión COBE, lanzada en 1989, y corroborada en misiones posteriores. El descubrimiento de la anisotropía del CMB fue reconocido mediante el Premio Nobel de Física en 2006, otorgado a dos de los investigadores principales de la misión COBE: George Smoot y John Mather.

## 5 POLARIZACIÓN DE FOTONES

Una de las propiedades de las inhomogeneidades del CMB particularmente interesante está relacionada con la polarización de los fotones. La radiación electromagnética es un fenómeno ondulatorio de carácter transversal. Esto quiere decir que el movimiento típicamente oscilatorio tiene lugar en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Los patrones de polarización de la onda describen posibles tipos de oscilaciones en este plano perpendicular. Los fotones que componen el CMB presentan un tipo de polarización, denominada lineal.

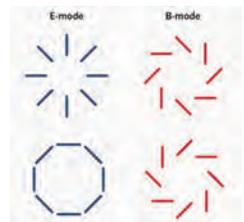


## LA INFLACIÓN



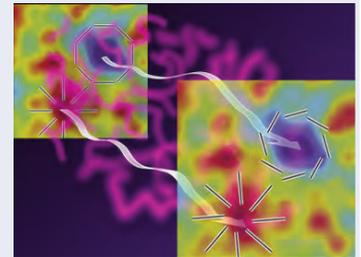
## 6 A LA CAZA DE MODOS B

La medida de la polarización de los fotones del CMB que nos llegan de distintas direcciones permitiría construir lo que se denomina un mapa de polarización. La construcción de este mapa completo de polarización es un objetivo de varios experimentos actuales, tal y como la colaboración BICEP o la misión Planck. La distribución de polarización presenta dos tipos de estructuras bien diferenciadas, denominadas modos E y B, por similitud con los campos eléctrico y magnético. Los modos E fueron detectados por primera vez en 2002 usando el telescopio DASI. Medir los característicos patrones rotacionales de los modos B es una tarea más compleja, ya que su intensidad es mucho menor (unas cien veces más pequeña). Además, en el espectro de modos B deberían existir dos grupos bien diferenciados, que se distinguen por su tamaño angular. La primera detección de modos B, a cargo del telescopio SPT, tuvo lugar en 2013. La existencia de estas estructuras, de tamaño angular inferior a un grado, fue corroborada posteriormente por la colaboración POLARBEAR. Por desgracia para los cosmólogos teóricos, por su tamaño angular estos modos B caen dentro del grupo menos interesante de los dos posibles. No ha sido hasta el año presente cuando la colaboración BICEP ha anunciado la detección de modos B que, por su tamaño angular (entre uno y cinco grados), deben pertenecer al segundo grupo de estos. La comunidad científica actual aguarda la corroboración del descubrimiento por parte de la misión Planck a lo largo de este mismo año.



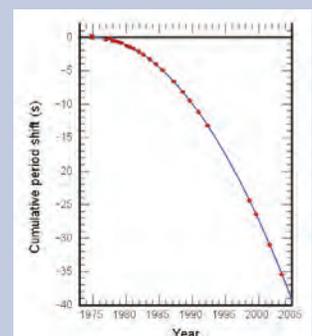
## 7 ¿QUÉ PUEDE CAUSAR LA EXISTENCIA DE MODOS B?

Cada uno de los dos grupos de modos B están asociados, teóricamente, a distintos mecanismos físicos. El primer grupo, constituido por las estructuras de menor tamaño angular, estaría causado por fenómenos de lente gravitatoria. Es decir, los modos B de este grupo constituyen distorsiones de modos E presentes en la señal original del CMB por las estructuras masivas que se formaron entre el origen de la señal y el punto de observación en la actualidad, la Tierra (véase la imagen adjunta). Por el contrario, las causas del segundo grupo pueden trazarse hasta el mismo momento del desacoplamiento entre materia y radiación. Esta es la razón de que los elementos de este grupo se conozcan habitualmente como modos B primordiales. Esto significa que el agente creador de dichos modos actuaba en los primeros instantes del universo. Los modelos teóricos actuales de esa edad tan temprana del universo apuntan que los modos B primordiales solo podrían ser creados por ondas gravitatorias que estuviesen presentes en el plasma primigenio. Por tanto, en base al conocimiento limitado actual del universo temprano, podríamos considerar la detección de modos B primordiales como una señal indirecta de la existencia de ondas gravitatorias en los primeros instantes del universo.



## 8 ONDAS GRAVITATORIAS

Una de las predicciones no confirmadas de la teoría de la relatividad general es la existencia de ondas gravitatorias. Estas ondulaciones constituirían la versión gravitatoria de las ondas electromagnéticas, mucho más familiares para los seres humanos. Esto no es accidental: la intensidad relativa teórica de las ondas gravitatorias respecto a las electromagnéticas resulta ser irrisoria. Esta es la razón fundamental de que haya sido imposible detectarlas por ahora pese a varias décadas de esfuerzos experimentales y económicos. Sin embargo, existen detecciones indirectas sólidas que generan una gran confianza en su detección en los próximos años. Estas detecciones hacen uso de sistemas astrofísicos conocidos como púlsares binarios. Un púlsar binario está constituido por una estrella de neutrones que emite radiación periódica (púlsar) y una compañera estelar, enana blanca o estrella de neutrones la mayoría de las veces. El primer descubrimiento de tal sistema binario en 1974 les valió a Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor el Premio Nobel de Física de 1993. Según la teoría de la relatividad general, un sistema binario de este tipo debería perder una fracción apreciable de su energía mediante la emisión de ondas gravitatorias. El correspondiente cálculo de la pérdida de energía en términos de los parámetros de la órbita resulta en un perfecto acuerdo con los datos experimentales. En caso de confirmarse, la detección de modos B primordiales podría considerarse como una prueba indirecta de la existencia de ondas gravitatorias adicional.





el "Moby Dick" de...

...Mayra Osorio (IAA-CSIC)

## HD169142

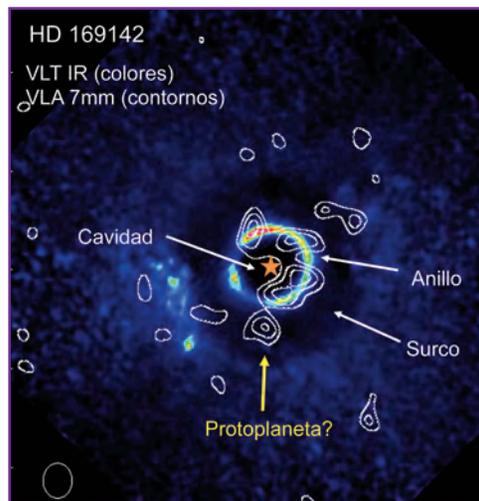


Nació en Veracruz (México) en 1969. Realizó su doctorado en la Universidad Nacional Autónoma de México y una estancia postdoctoral en el *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics* de Estados Unidos. Actualmente es doctora contratada en el IAA.

**H**ace algunos años, un perspicaz radioastrónomo, a quien todos conocen como Chema, me invitó a estudiar un disco protoplanetario que rodea a HD 169142, una estrella de masa dos veces mayor que la del Sol. Al principio no estaba muy entusiasmada, porque hasta entonces me había concentrado en investigar la formación de las estrellas de masa mucho mayor. Chema había encontrado unos datos antiguos en el archivo del *Very Large Array* (VLA, un conjunto de antenas situado en un desierto de Nuevo México, en EEUU, que es un excelente instrumento para detectar las débiles ondas de radio que se originan en la proximidad de las protoestrellas), y quería que yo elaborara un modelo para inferir las propiedades del disco. Publicamos un artículo donde reportamos las observaciones de radio y algunas propiedades del disco derivadas del modelo, como su masa, temperatura, etc. Pero el objeto parecía prometedor, y queríamos obtener una imagen que revelara su apariencia. El VLA puede configurarse como un "zoom", y pedimos tiempo de observación para obtener una imagen en la configuración que proporciona mayor detalle. Cuando obtuvimos la imagen nunca pensé que sería la primera de una larga serie de observaciones que realizamos con el VLA para tratar de entender dicho disco. La imagen era diferente a las obtenidas previamente con los telescopios infrarrojos, pues en ella el disco aparecía como una pequeña estructura alargada, formada por grumos, y que parecía tener forma de espiral, mientras que en las otras imágenes aparecía redondo y con un tamaño mayor. Para tratar de resolver el dilema enviamos nuevas propuestas de observación. Pero empezábamos a sospechar que en la imagen de radio estábamos viendo la región más interna del disco, y quizás aquellos grumos eran signos de formación de planetas. Los granos de polvo que existen en el medio interestelar son muy pequeños, con tamaños de milésimas de micra, pero en los discos protoplanetarios estos granos se van agregando y creciendo hasta alcanzar tamaños mucho mayores hasta, finalmente, formar los planetas. Las imágenes infrarrojas son especialmente sensibles a la emisión de los granos de polvo microscópicos, mientras que las

imágenes de radio muestran la de los granos que ya han alcanzado hasta varios centímetros.

Aunque en los últimos años se han descubierto más de mil setecientos exoplanetas, solo en muy contados casos se ha obtenido imagen, y todavía no se ha logrado una imagen de un planeta en formación. En HD



169142 quizás estábamos viendo, precisamente, las "semillas" de gas y polvo que más tarde se convertirían planetas. De ser esto cierto, HD 169142 podría revelar mucho acerca de los mecanismos de formación de planetas.

La mayor parte de los investigadores del grupo en el que trabajo son radioastrónomos y yo hago modelos para reproducir algunas de sus observaciones. Me llevó mucho tiempo convencerles de que HD 169142 era realmente interesante y que debíamos seguir observándola. Pero las observaciones eran muy complicadas porque la estrella se ve con dificultad desde el hemisferio norte, donde está situado el VLA. Por otra parte, el propio VLA estaba sufriendo un proceso de reestructuración para convertirlo en un instrumento más sensible y sus características eran inestables. HD 169142 tampoco ayudaba, ya que repentinamente disminuyó su brillo, frustrando nuestras expectativas iniciales de observarla fácilmente.

Muchas cosas pasaron durante todo ese tiempo. Mi hija nació, creció, mi colaboradora y profesora (que me había enseñado a

calcular y reproducir las observaciones de estos discos protoplanetarios) falleció, y yo seguía sin entender a HD 169142.

El año pasado, un grupo de investigadores suizo obtuvo unas imágenes de la luz infrarroja dispersada de HD 169142 con el telescopio *Very Large Telescope* (VLT, situado en Chile). En estas imágenes se podía intuir que en el disco se había abierto una cavidad central y luego, a una distancia mayor, se había creado un surco circular. Esto puede ocurrir si el material del disco está siendo evacuado por la presencia de embriones planetarios orbitando en torno a la estrella. Si esto es así, a HD169142 se le puede clasificar dentro de la selecta categoría de los llamados discos de transición, es decir, ¡de transición para formar planetas!

Por otra parte, en el VLA había ya finalizado el proceso de remodelación, de modo que era capaz de obtener mejores imágenes. Comparamos las imágenes recientes del VLA con las de luz infrarroja (ver imagen) y comprobamos que la emisión en radio coincide justamente con la pared o borde de la cavidad central, corroborando que en su interior existe un

vacío de material, algo que no podía verse bien en el infrarrojo porque la estrella satura el centro de la imagen. También se ve en nuestra imagen que hay un grumo de material dentro del surco exterior (situado aproximadamente a la distancia de la órbita de Neptuno), lo que sugiere que es posible que estemos observando directamente material protoplanetario que allí se está acumulando.

Después de esto, los dos grupos hemos unido esfuerzos para un estudio simultáneo en radio e infrarrojo. Estamos analizando nuevos datos, esperando confirmar, a través de imágenes directas, si en el disco de HD 169142 se están formando dos planetas, uno en la cavidad central y otro en el surco más exterior.

Mucho tiempo ha pasado desde el inicio del proyecto, y mucha gente se ha involucrado durante este tiempo. No sé si lograremos nuestro objetivo final. Quizás se consiga con nuevas observaciones o quizás surjan aún más dudas. Este es posiblemente uno de los proyectos más difíciles en que me he involucrado, pero también uno de los más fascinantes.

# Un cúmulo estelar fugitivo

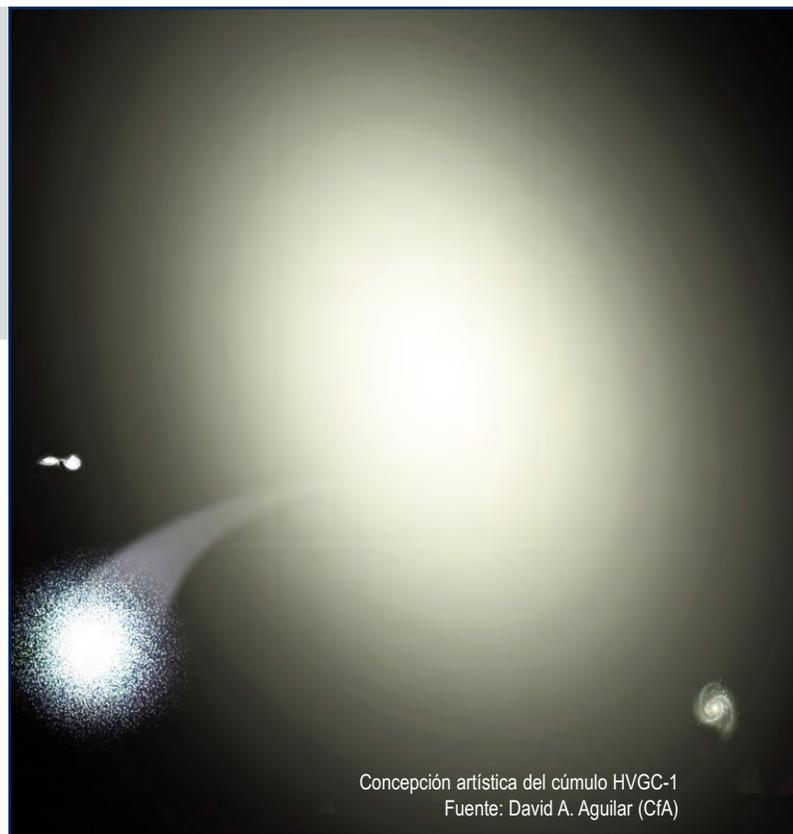
Un cúmulo que escapa de su galaxia a más de mil kilómetros por segundo ha inaugurado un nuevo catálogo, el de cúmulos estelares de alta velocidad

► Recientemente, un grupo de astrónomos liderados por Nelson Caldwell, del centro para Astrofísica Harvard-Smithsonian, ha medido con ayuda del telescopio MMT de 6,5 metros en Arizona la velocidad de los cúmulos globulares de estrellas que orbitan alrededor de la galaxia elíptica gigante M87. Y han encontrado uno que se está escapando de la galaxia a más de mil kilómetros por segundo, es decir, a más de tres millones de kilómetros por hora. El grupo de científicos ha bautizado al cúmulo como HVGC-1, u objeto número 1 del recién inaugurado catálogo de cúmulos globulares de alta velocidad. Hasta ahora eran conocidos numerosos ejemplos de estrellas a la fuga, astros que son despedidos desde las galaxias al espacio exterior, vagando sin rumbo en el medio intergaláctico. Este peculiar hecho se produce como consecuencia de los tirones gravitacionales que las estrellas pueden sufrir entre ellas y con el pozo de potencial que tienen todas las galaxias en su centro. Sin

embargo, esta es la primera vez que se encuentran evidencias de que este mismo hecho ocurra con todo un cúmulo de estrellas.

Los cúmulos globulares son vestigios de las épocas de formación de las galaxias y contienen algunas de las estrellas más viejas de las mismas. Se produjeron al colapsarse gigantes nubes de gas, antes de que estas cayeran al disco plano de la galaxia, formando aglomeraciones de varios miles de estrellas concentradas alrededor de un centro de gravedad común y diferente del de la galaxia. Estos cúmulos tienen órbitas muy estables alrededor de los centros galácticos, aunque en la zona de los halos esféricos de las galaxias, fuera del plano donde orbitan la mayoría de las estrellas en una galaxia espiral. En nuestra Galaxia se han encontrado unos ciento cincuenta de estos cúmulos globulares. Y, a pesar de ser mucho más masivos que las estrellas individuales, las órbitas de los cúmulos pueden verse alteradas por la interacción con otras galaxias si estas pasan lo suficientemente cerca de ellos.

La galaxia Messier 87 o Virgo A es una elíptica supergigante y la segunda más brillante del cúmulo de galaxias de Virgo, a más de cincuenta millones de años luz de la Tierra. Esta galaxia es un prototipo de galaxia con un núcleo activo, que emite en todas las longitudes de onda, desde los rayos X a las ondas



Concepción artística del cúmulo HVGC-1  
Fuente: David A. Aguilar (CfA)

de radio, como fruto de la interacción de la materia con el intensísimo campo de gravitación del agujero negro supermasivo de su centro. El aspecto elíptico de esta galaxia se debe probablemente a la interacción con muchas otras galaxias más enanas del denso espacio del cúmulo de galaxias al que pertenece, y que han hecho que M87 creciera hasta alcanzar un tamaño tres veces mayor que el de nuestra Vía Láctea. De hecho,

en su interior no hay solo un agujero negro supermasivo, sino dos, lo que sería indicativo de la fusión de dos objetos diferentes en un pasado reciente. Si el cúmulo globular HVGC-1 tuvo un encuentro cercano con uno de esos dos agujeros negros, su trayectoria podría haber sido alterada, viéndose lanzado a gran velocidad fuera del sistema.

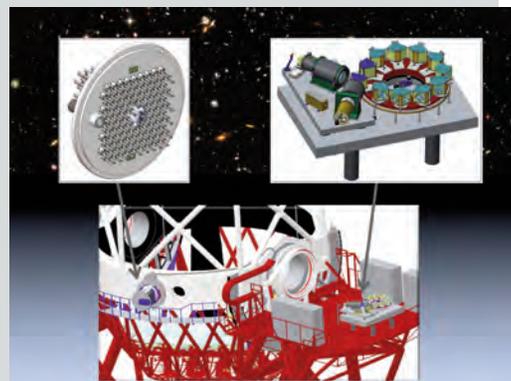
Enrique Pérez Montero (IAA)

## EN BREVE:

### Se firma el contrato para la construcción de MEGARA, el próximo instrumento óptico para el Gran Telescopio Canarias

► Recientemente ha tenido lugar la firma del convenio entre la Universidad Complutense y la empresa GRANTECAN para la construcción de MEGARA (Multi-Espectrógrafo en GTC de Alta Resolución para Astronomía), el próximo instrumento óptico del Gran Telescopio Canarias. Liderado por investigadores de la Universidad Complutense de Madrid, su construcción se llevará a cabo a través de un consorcio de instituciones españolas y mexicanas, entre las que se encuentra el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC).

MEGARA utilizará la última tecnología en fibras ópticas, necesarias para cubrir el cielo de forma contigua, y en elementos dispersores -las conocidas como redes holográficas-. El uso de estas tecnologías en un instrumento con alta resolución espectral combinado con el gran tamaño del espejo del Gran Telescopio CANARIAS (GTC) no tiene precedentes y permitirá abordar problemas hasta ahora fuera del alcance de los astrónomos. <http://guaix.fis.ucm.es/megara>



# Se observa el mayor impacto de una roca contra la Luna

La colisión, observada por investigadores de la Universidad de Huelva y del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), produjo un destello casi tan brillante como la estrella Polar

► El 11 de septiembre de 2013 una roca con la masa de un coche pequeño chocó contra la Luna y produjo un destello casi tan brillante como la estrella Polar. Se trata de la colisión más potente detectada hasta la fecha y su destello, de unos ocho segundos, el más longevo e intenso observado. Investigadores de la Universidad de Huelva y del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) publicaron el análisis del impacto en la revista *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

“En ese momento fui consciente de que acababa de ser testigo de un acontecimiento extraordinario”, declaraba José María Madiedo, investigador de la Universidad de Huelva (UHU) que detectó la colisión. El hallazgo fue posible gracias a dos telescopios del Proyecto MIDAS (acrónimo en inglés de

Sistema de Detección y Análisis de Impactos en la Luna), desarrollado por Madiedo conjuntamente con José Luis Ortiz, del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC).

Estos impactos los producen, mayoritariamente, fragmentos de cometas y asteroides que giran alrededor del Sol y que técnicamente se conocen como meteoroides. La Tierra posee una atmósfera protectora que evita que la mayoría de los meteoroides que impactan contra ella alcancen el suelo, pero la Luna carece de ese escudo y hasta los fragmentos más pequeños pueden chocar contra su superficie y producir un cráter.

## Quince toneladas de TNT

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



ocho segundos que tardó en extinguirse el brillo del impacto del 11 de septiembre.

El análisis llevado a cabo por Madiedo y Ortiz calcula que el nuevo cráter podría medir unos cuarenta metros de diámetro, y que el meteoroides que produjo el impacto presentaba una masa de unos cuatrocientos kilos y un diámetro comprendido entre 0,6 y 1,4 metros. Se trata de cifras aproximadas, ya que su determinación depende sobre todo de un parámetro físico no muy bien conocido, denominado “eficiencia luminosa”. La colisión tuvo lugar a unos sesenta y un mil kilómetros por hora en la zona conocida como *Mare Nubium* (Mar de las Nubes), una antigua cuenca de lava solidificada con una extensión similar a la de la Península Ibérica.

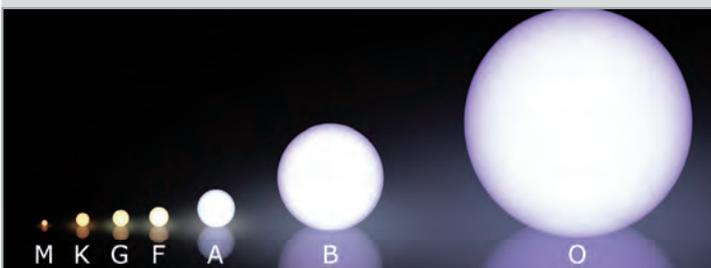
La energía implicada en el impacto

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

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

# El sondeo GOSSS abre la puerta al estudio de las estrellas de masa extrema

GOSSS se ha diseñado para evitar el carácter incompleto y poco homogéneo de las muestras anteriores, que conducían a errores sistemáticos en la clasificación de las estrellas



► En nuestro entorno galáctico solo una de cada dos millones de estrellas es de tipo O, una clase cuyos miembros tienen desde dieciséis a más de cien masas solares y una luminosidad de hasta varios millones de veces la del Sol. Estas estrellas, que culminan en explosiones de supernova, influyen de modo determinante en la estructura y evolución de las galaxias. Además, son las responsables de la existencia de, entre otros, algunos de los elementos que nos componen,

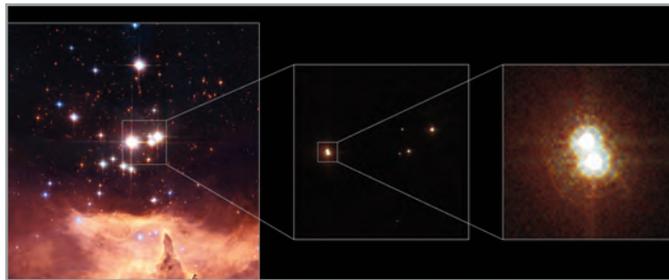
pero su escasez dificulta su conocimiento. El catálogo GOSSS, que acaba de publicar los datos de 448 objetos, abre una ventana a estos gigantes estelares.

Las estrellas se clasifican en los tipos O, B, A, F, G, K y M (donde las primeras son las más masivas y calientes) dependiendo de las líneas que presenten sus espectros, que se obtienen haciendo pasar su luz por un prisma y que corresponden a los diferentes elementos químicos que las componen.

Pero si los datos presentan mala calidad o distintas técnicas de observación pueden producirse errores en la clasificación: por ejemplo, en algunos catálogos la estrella theta1 Orionis A aparece como de tipo O, cuando en realidad es de tipo B. Y no se trata de un caso aislado.

“GOSSS (*Galactic O-Star Spectroscopic Survey*) presenta mejoras sustanciales con respecto a catálogos anteriores -destaca Alfredo Sota, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que encabeza la publicación de los datos-. Se trata de un proyecto muy ambicioso en cuanto a la cantidad de objetos y a la calidad de los datos, que aportará una muestra homogénea, con datos de ambos hemisferios y que se actualizará constantemente, de modo que constituye una herramienta realmente sólida”, concluye el investigador.

El espectro de un objeto celeste nos permite conocer sus características esenciales, como la distancia, edad, luminosidad o incluso la tasa de pérdida de masa. Información muy necesaria en el caso de las estrellas de tipo O, sobre las que aún no disponemos de una teoría completa sobre su naci-



La estrella Pismis 24-1, un sistema múltiple de estrellas masivas. A principios de este siglo se estimó que su masa estaba entre 210 y 291 veces la del Sol. Observaciones más recientes muestran Pismis 24-1 como dos fuentes puntuales claramente separadas. Además, una de las dos fuentes puntuales es en realidad un sistema de dos estrellas, elevando el número total a tres. Las masas (una vez resuelto el sistema en tres componentes) resultan ser de ~96, ~64 y ~64 masas solares, valores elevados pero muy inferiores a la estimación anterior. Fuente: NASA, ESA y Jesús Maíz (IAA).

miento y evolución. La muestra de GOSSS, que abarcará cuando se complete un total de mil estrellas de tipo O (en torno a un 2% del total de la Vía Láctea), permitirá resolver cuestiones esenciales sobre estas tradicionalmente esquivas estrellas.

#### Cinco catálogos en uno

Una característica esencial de las estrellas de masa extrema reside en que casi nunca se hallan en solitario, sino que forman sistemas dobles, triples o múltiples de mayor orden. “Un rasgo afortunado que permite conocer la masa de cada una de ellas, pero

también desafortunado porque varias estrellas próximas pueden parecer un único objeto desde nuestra perspectiva y porque estudiar este tipo de sistemas resulta técnicamente muy complejo”, señala Jesús Maíz (IAA-CSIC), investigador principal de GOSSS.

Para afrontar el estudio de los sistemas múltiples, investigadores del proyecto GOSSS han desarrollado cuatro catálogos paralelos: OWN, IACOB, NoMaDS y CAFÉ-BEANS. Los dos primeros están realizando, en el hemisferio sur y norte respectivamente, espectroscopía de alta resolución y en diferentes épocas de una

submuestra de GOSSS con el objetivo de hallar estrellas binarias, determinar sus características y medir sus órbitas. NoMaDS es una extensión de IACOB a estrellas algo más débiles y CAFÉ-BEANS completará el trabajo de OWN sobre un tipo específico de estrellas binarias en el hemisferio norte.

Estos catálogos se completan con la obtención de imágenes en alta resolución y, en conjunto, proporcionan la visión más completa hasta la fecha de las estrellas de tipo O. Un trabajo que ya está aportando resultados destacados, como el hallazgo de la estrella masiva con el campo magnético más intenso hallado hasta ahora (unas veinte mil veces más intenso que el del Sol).

El proyecto GOSSS, que arrancó en 2007 y lleva empleadas más de doscientas cincuenta noches de observación, se desarrolla en el Observatorio de Sierra Nevada (Granada), el Observatorio de Calar Alto (Almería), el Observatorio de La Palma (telescopio William Herschel) y el Observatorio de Las Campanas (Chile).

Silbia López de Lacalle (IAA)

## Hallado el primer sistema de anillos en un cuerpo del Sistema Solar que no es un planeta

Cariclo, un objeto de unos doscientos cincuenta kilómetros de diámetro, muestra dos anillos compuestos posiblemente por hielo de agua

► Hasta ahora parecía que los sistemas de anillos eran un rasgo exclusivo de los planetas gigantes, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Sin embargo, un pequeño objeto de apenas doscientos cincuenta kilómetros de diámetro acaba de ingresar en ese reducido grupo: una ocultación estelar ha mostrado que (10199) Chariklo (Cariclo en castellano), un planeta menor situado entre Saturno y Urano, presenta dos densos anillos, posiblemente formados por hielo de agua. El hallazgo, publicado en la revista *Nature*, implica que los anillos pueden



Concepción artística de Cariclo y su sistema de anillos (IAA)

ser estructuras más comunes de lo que se pensaba, al menos en las regiones más externas del Sistema Solar.

El descubrimiento fue posible gracias a la observación, desde ocho enclaves distintos, del paso de Cariclo por delante de una estrella (una ocultación), que en este caso produjo resultados inesperados. Además de los even-

tos típicos, correspondientes al comienzo y final de la ocultación, los astrónomos hallaron otros dos eventos breves difíciles de explicar.

“Estábamos muy sesgados por la idea de que los eventos breves de ocultación se debieran a material que Cariclo pudiera expulsar en chorros, como lo hacen los cometas, ya que este objeto

tiene algunas propiedades y hasta la órbita parecida a las de los cometas”, apunta José Luis Ortiz, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que participa en el hallazgo.

“Tras dar muchas vueltas a los datos me di cuenta de que estábamos detectando material que se distribuía en una

elipse alrededor de Cariclo, formando un anillo como el de Saturno. En ese momento todo empezó a aclararse y no solo encajaron todas las piezas del puzle, sino que pudimos explicar otros fenómenos extraños que se habían observado años antes", continúa el astrónomo.

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

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

Los anillos, separados por una zona estrecha y oscura, muestran una anchura de siete y cinco kilómetros respectivamente y presentan una masa

total equivalente a un cuerpo helado de cuatro kilómetros de diámetro. Su posición indica que o bien se trata de un sistema formado recientemente o bien que existe un cuerpo, lo que suele conocerse como "satélite pastor", que contribuye a que los anillos permanezcan confinados pero que aún no se ha detectado.

Los astrónomos barajan varias explicaciones sobre el origen de los anillos, pero creen que es muy posible que tengan relación con la existencia de satélites, que pudieron impactar y generar un disco de "escombros" en torno a Cariclo. Aunque el hallazgo de anillos en un planeta menor parece apuntar a que se trata de estructuras más comu-

nes de lo que se pensaba, por ahora Cariclo es un objeto excepcional.

El hallazgo ha sido posible gracias a una red de telescopios distribuida entre Chile, Brasil, Argentina y Uruguay, algunos de los que fueron utilizados en remoto desde Granada por el observador del grupo de investigación del IAA-CSIC Nicolás Morales. Debido al reducido tamaño y la lejanía de Cariclo, el sistema se ve como un punto de luz incluso con los telescopios más potentes, y solo con la técnica de las ocultaciones estelares ha podido distinguirse la existencia de los anillos (aunque no disponemos imágenes de ellos).

Silbia López de Lacalle (IAA)

## Los "terromotos" estelares permiten conocer el interior de las estrellas más masivas y calientes que el Sol

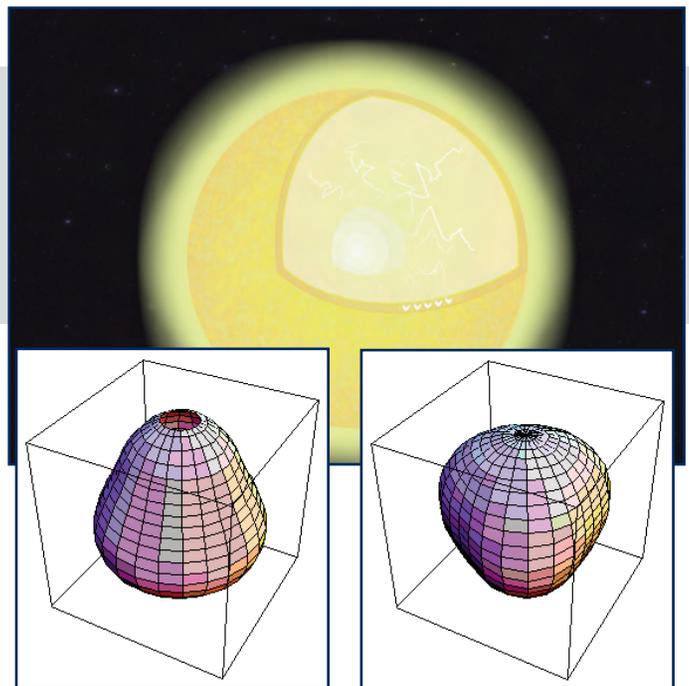
La propagación de ondas sonoras en el interior de las estrellas produce oscilaciones en su superficie, cuyo estudio permite conocer la estructura interna y la edad de las estrellas. Esta técnica se ha mostrado por primera vez eficaz para estudiar en detalle estrellas más masivas que el Sol

► Conocer qué ocurre dentro de las estrellas resulta imprescindible para datar las poblaciones estelares y constreñir así los modelos cosmológicos, o para determinar la masa y el tamaño de los planetas hallados en torno a otras estrellas, entre otros. Y la astrosismología, o el estudio de las oscilaciones estelares, se presenta como la única vía de acceso al interior estelar. Ahora, un estudio encabezado por investigadores del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) muestra por primera vez la validez de esta herramienta en el estudio de estrellas más masivas y calientes que el Sol.

"Gracias a la astrosismología conocemos con precisión la estructura interna, masa, radio, rotación o evolución de estrellas de tipo solar, pero no habíamos sido capaces de aplicar esta herramienta con eficacia al estudio de estrellas más masivas y calientes", destaca Juan Carlos Suárez,

investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC). La sismología estelar consiste, en cierto sentido, en concebir las estrellas como cavidades resonantes, donde el movimiento del gas genera ondas sonoras que se propagan. Muchas de esas ondas tienden a desvanecerse pero, si existe un mecanismo que las sustente, alcanzan un estado estacionario y deforman la superficie de la estrella, produciendo distintos modos de oscilación (observados como cambios locales en brillo y temperatura).

Al atravesar distintas zonas de la estrella los modos de oscilación se ven afectados y, dependiendo de por dónde han pasado, se concretarán en una deformación u otra en la superficie. "Algunos modos son más sensibles a lo que ocurre en el interior, otros a lo que ocurre en superficie y otros al tamaño del núcleo. Y todos dependen de la composición química,



Arriba: estructura interna de una estrella delta-Scuti, que muestra un núcleo, una capa radiativa extensa y una capa convectiva muy fina (IAA). Debajo: animación que muestra dos modos de oscilación del Sol (David Guenther, Saint Mary's Univ.).

estructura interna y edad de la estrella. Nosotros empleamos modelos matemáticos para determinar qué tipo de estructura y características permiten que esos modos se observen", explica Juan Carlos Suárez (IAA-CSIC)

### Un gran avance en la física estelar

Su estudio se ha centrado en un tipo

de estrellas conocidas como delta-Scuti, cuya masa fluctúa entre 1,5 y 2,5 veces la del Sol y que rotan tan rápido que llegan a deformarse (en lugar de ser esféricas tienden a achatarse). Debido a la rápida rotación su espectro de oscilaciones resulta muy difícil de interpretar y, aunque se habían detectado patrones estables, se desconocían sus propiedades físicas.

Sin embargo, el reciente resultado ha desvelado una relación, muy similar a la que existe en estrellas de tipo solar, entre determinados patrones de oscilación de las estrellas delta-Scuti y su densidad media. “Este trabajo da un salto enorme al mostrar que podemos conocer estrellas hasta cuatro veces más masivas que el Sol con el mismo detalle que las de tipo solar”, destaca Juan Carlos Suárez.

Conocer la densidad media de una

estrella permite no solo determinar su masa y radio con exactitud, sino que también posibilita ceñir con precisión el modelo que aporta el resto de características esenciales de la estrella. Unas medidas que resultan indispensables para la determinación de la masa, radio o edad de los planetas extrasolares -planetas que orbitan estrellas distintas al Sol-

“Cada vez se descubren más planetas alrededor de estrellas más masi-

vas que el Sol, y este resultado permitirá determinar sus características. Supone un valor añadido para la misión PLATO (ESA), que caracterizará sistemas planetarios y aportará valiosa información para comprender el origen y evolución de los sistemas planetarios, imprescindible en la búsqueda de vida más allá de la Tierra”, apunta Juan Carlos Suárez, miembro del board de la misión PLATO.

Este resultado ha sido posible gracias

a TOUCAN, un gestor de modelos de astrosismología desarrollado por investigadores del IAA y el Observatorio Virtual Español (CAB-INTA-CSIC). TOUCAN permite comparar millones de modelos y hacer estudios estadísticos de distintos parámetros, con la ventaja de que se halla integrado en el Observatorio Virtual, de modo que todos los modelos están homogeneizados.

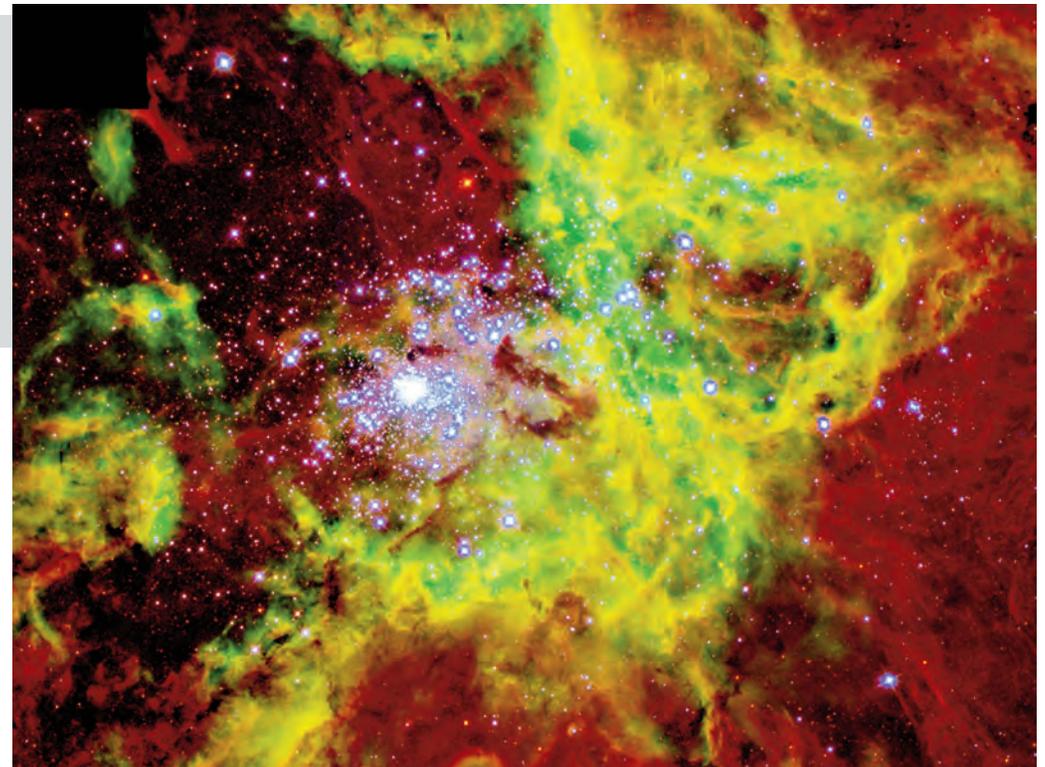
**Silbia López de Lacalle (IAA)**

## Se reescriben las leyes que determinan cómo el polvo modifica la luz que nos llega de las estrellas

El polvo del medio interestelar extingue la luz, que llega a los telescopios oscurecida en todas las longitudes de onda. Las limitaciones de las leyes empleadas desde 1989 para corregir este efecto, que inducen a errores en la caracterización de las estrellas, hacían necesario un relevo

► Conocer las propiedades de una estrella podría ser tan sencillo como tomar una imagen y medir su brillo (lo que se conoce como fotometría) si el medio que atraviesa nuestra línea de visión fuera transparente. Pero el medio interestelar se halla salpicado de polvo, que absorbe y dispersa la luz y provoca que los objetos parezcan menos luminosos y más rojos -o fríos- de lo que en realidad son. Un efecto que, con un trabajo publicado recientemente, por fin puede corregirse de forma eficaz.

“En la longitud de onda de la luz que ven nuestros ojos, el visible, de cada billón de fotones emitidos por una estrella en el centro de la Vía Láctea solo uno consigue alcanzarnos -señala Jesús Maíz Apellániz, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que encabeza la publicación-. Este es un ejemplo



extremo de cómo el polvo afecta a la luz de las estrellas, un fenómeno que se produce con menos intensidad pero sin excepción en todos los entornos”.

Así, en todas las observaciones astronómicas deben corregirse los efectos del polvo antes de intentar extraer las características de un objeto. Y el investigador del IAA, junto con un grupo internacional de colaboradores, comprobó que las leyes empleadas hasta ahora para calcular la extinción de la luz producida por el polvo, que datan de 1989, presentaban importantes limitacio-

nes y, entre otras cosas, aportaban estimaciones de temperatura erróneas para las estrellas. De modo que asumieron la tarea de cambiar esas leyes.

### Unas leyes nuevas para un problema antiguo

El método ideal para ello residía en disponer de un grupo de objetos cuyas características (brillo, temperatura...) se conocieran de antemano de manera fidedigna mediante espectroscopía y compararlas con las que aporta la fotometría sometida a la corrección con las leyes de

La nebulosa 30 Doradus.  
Fuente: NASA, N. Walborn, J. Maíz Apellániz y R. Barbá.

extinción tradicionales. Así, cualquier desviación permitiría detectar los errores y corregir las leyes.

“Necesitábamos datos perfectos para una muestra de objetos idóneos, y la hallamos gracias al sondeo VLT-FLAMES, un proyecto del Observatorio Europeo Austral (ESO) centrado en la nebulosa 30 Doradus, o nebulosa de la Tarántula, situada en la Gran Nube de Magallanes”, apunta Jesús Maíz Apellániz (IAA-

CSIC). Los investigadores, que comenzaron este trabajo hace seis años, partieron de una primera muestra de mil estrellas y la redujeron hasta ochenta y tres objetos "idóneos".

Tras someter esta muestra a distintos experimentos, que confirmaron las grandes desviaciones que producen las leyes de extinción de 1989,

desarrollaron una versión actualizada que, por ejemplo, reduce a un tercio los errores en la determinación de temperaturas.

De hecho, los resultados de las nuevas leyes se acercan a la precisión de los que se obtienen gracias a la espectroscopía, que se mantiene como el mejor método para estudios detallados. "Sin embargo, gracias a

este trabajo podemos obtener estimaciones de temperatura aceptables mediante fotometría, con la ventaja de que esta técnica permite estudiar más objetos por unidad de tiempo", destaca Maíz Apellániz (IAA-CSIC). La investigación llega en el momento oportuno, ya que unas leyes de extinción limitadas impiden explotar la gran calidad de los datos que

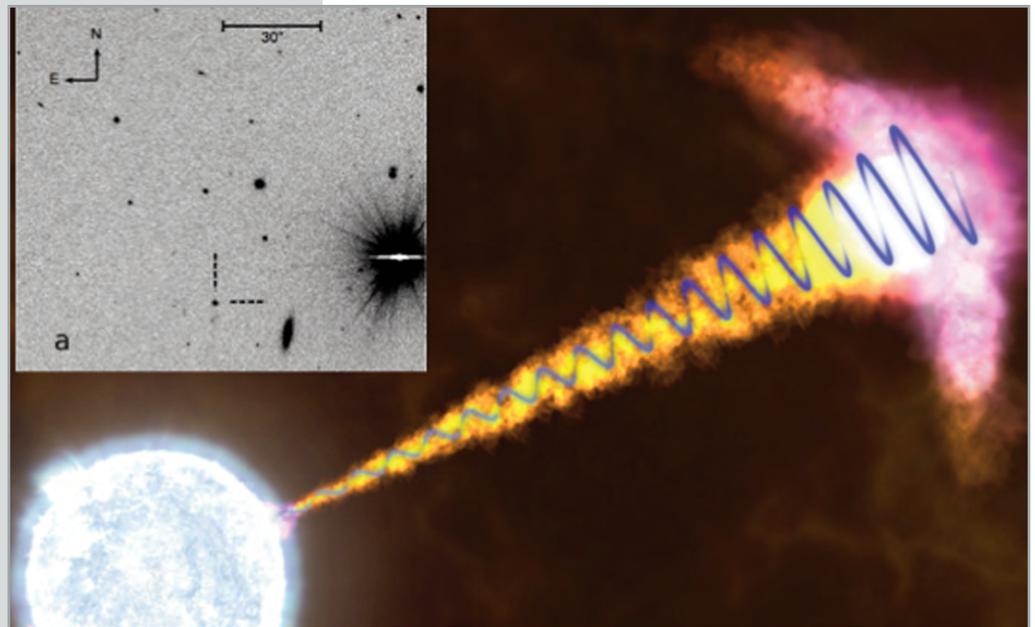
obtienen los instrumentos actuales, como el telescopio espacial Hubble. Además, nos hallamos en una época en auge para los sondeos fotométricos masivos, como la misión GAIA, que observará mil millones de estrellas de la Vía Láctea, para los que este trabajo será clave.

Silbia López de Lacalle (IAA)

## Se detecta, por primera vez, la firma del nacimiento de un agujero negro en una explosión estelar

Ha sido posible gracias a la observación, con el Very Large Telescope (ESO) de la explosión de rayos gamma GRB121024A

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



► Hace unos once mil millones de años, una estrella con más de cien veces la masa del Sol agotó su combustible y se derrumbó sobre sí misma, proceso que produjo una explosión de rayos gamma -o un GRB, su acrónimo en inglés-, uno de los eventos más energéticos del universo. Su estudio, publicado en la revista *Nature*, ha permitido detectar por primera vez la firma inequívoca de la formación de un agujero negro.

Esa firma consiste en una vibración específica de la luz conocida como polarización circular. "La luz que recibimos del universo es el resultado de la superposición desordenada de muchas ondas electromagnéticas que vibran aleatoriamente, es decir, luz no polarizada -ilustra Javier Gorosabel, investigador del Instituto

de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC/UPV-EHU) que participa en el hallazgo-. Bajo algunas circunstancias, la luz de algunos astros vibra preferentemente en un plano, dando lugar a luz polarizada linealmente. Pero en este GRB hemos hallado luz que viaja como si fuera un sacacorchos, es decir, polarizada circularmente".

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

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

Además, su luz se emite a través de dos chorros alineados con el eje de rotación que presentaba la estrella moribunda.

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

agujero negro, y cuyos efectos se sienten a distancias de billones de kilómetros", apunta Javier Gorosabel (IAA-CSIC/UPV-EHU).

Todo este complejo escenario predice una ineludible firma: producto de este géiser magnético, la luz óptica emitida a través de los chorros debe estar polarizada circularmente. Y esto es, precisamente, lo que han hallado los autores en GRB121014A gracias a la precisión del Very Large Telescope (ESO) en Chile. "Posiblemente lo que hemos

detectado son los efectos que el nacimiento de un agujero negro provoca en su entorno", resume Gorosabel.

### GRBs: de incógnita a fuente de información

Las explosiones de rayos gamma son destellos breves e intensos de radiación gamma que se producen

al azar en cualquier lugar del cielo y que se relacionan con procesos ligados a sucesos catastróficos en las estrellas. Se clasifican, según su duración, en GRBs cortos (pocos milisegundos) y largos (hasta media hora), generados por la fusión de dos objetos compactos y el colapso de una estrella muy masiva respectivamente.

La atmósfera de la Tierra es opaca a los rayos gamma, de modo que los GRB solo se pueden captar gracias a detectores embarcados en aparatos espaciales, como el satélite Swift de la NASA, responsable de la detección de GRB121014A. Descubiertos en 1967, los GRBs constituyeron un enigma hasta que en 1997 se confirmó que procedían de

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

## La misión espacial Rosetta observa el "despertar" de su cometa

El cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, objetivo de la misión Rosetta (ESA), ha comenzado a desarrollar la coma, una envoltura de polvo que rodea el núcleo

► "67P está empezando a parecer un cometa de verdad", comentaba Holger Sierks (MPS), investigador principal de la cámara OSIRIS, a bordo de la misión Rosetta (ESA). Las imágenes tomadas por OSIRIS a finales de abril muestran claramente un cambio en el aspecto del cometa: el núcleo se encuentra ya rodeado por una envoltura de polvo, la coma, que se extiende unos mil trescientos kilómetros en el espacio. Los cometas, pequeños cuerpos sólidos helados que proceden de las regiones externas del Sistema Solar, sufren modificaciones drásticas al acercarse al Sol. Debido al aumento de la temperatura, los hielos se calientan, se evaporan (subliman) y arrastran consigo los granos de polvo, que al quedar libres reflejan la luz solar y dan lugar a la coma (la mancha difusa central que envuelve al núcleo) y las colas.

El cometa 67P se halla aún a más de seiscientos millones de kilómetros del Sol, más de cuatro veces la distancia entre la Tierra y el Sol. "Las múltiples campañas de observación del cometa realizadas desde tierra no habían permitido detectar actividad a distancias tan grandes del Sol. Este resultado es ya *per se* de una importancia crucial, y el primero de

los muchos que OSIRIS y Rosetta nos regalarán en los próximos dos años", apunta Luisa M. Lara, investigadora del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) e integrante del equipo OSIRIS.

Esta primera muestra de actividad cometaria ofrece a los científicos la oportunidad de estudiar la producción de polvo y las estructuras de la coma en etapas tempranas. Además, el equipo OSIRIS ha podido, a partir de los cambios periódicos de brillo del cometa, establecer su rotación en 12,4 horas. "Son veinte minutos menos que las estimaciones realizadas a partir de datos desde tierra, lo que sin lugar a dudas tendrá implicaciones en la planificación de cómo la nave Rosetta orbitará al núcleo del cometa", apunta Luisa M. Lara (IAA-CSIC).

### Una misión pionera

"Es difícil de creer que, dentro de

pocos meses, Rosetta vaya a sumergirse en esa nube de polvo para revelarnos el origen de la actividad del cometa", destaca Holger Sierks (MPS). Y es que, tras diez años de paseo espacial, en los próximos meses la sonda Rosetta se va a encontrar por fin con su objetivo, el cometa 67P. La misión, que tiene como principal objetivo el estudio del origen y evolución de los cuerpos primitivos del Sistema Solar, será la primera en orbitar el núcleo de un cometa y acompañarle en su recorrido hacia el Sistema Solar interno. Así, será también la primera misión que examinará de cerca la transformación de un cometa al aproximarse al Sol y que, además, realice un contacto directo con el núcleo de este a través del módulo Philae. Se trata de una misión de una complejidad sin

precedentes, pues muchas de las maniobras de navegación y aterrizaje deben realizarse de forma automática sin el más mínimo margen de error. El IAA-CSIC ha participado en la ciencia y el diseño de dos de sus instrumentos, la cámara OSIRIS y GIADA, que analizará la dinámica y composición de los granos de polvo. Los investigadores Pedro J. Gutiérrez, Luisa María Lara y José Juan López Moreno, del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), y Rafael Rodrigo del Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA) forman parte del equipo científico internacional de OSIRIS, y participan activamente tanto en las tareas de apoyo para asegurar el mejor rendimiento científico del instrumento como en el análisis de los datos que está recogiendo.

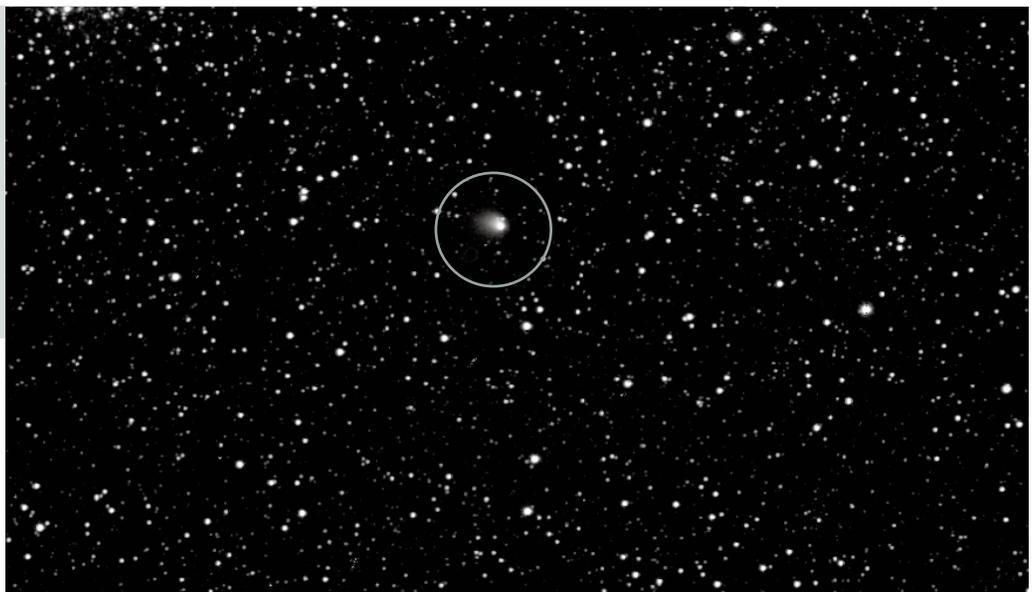


Imagen tomada por OSIRIS el 30 de abril. Se observa claramente la coma, con unos mil trescientos kilómetros de extensión. Fuente: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA.

# SALA limpia

por Miguel Abril (IAA)



## la respuesta:

¿Cuál es la capacidad de almacenamiento de una bolsa de BocaBits?

El ganador del concurso ha sido Rafael Zambrana, quien, en un alarde de espíritu científico, se ha documentado comprando varias bolsas de BocaBits (no nos dice cuántas) y ha encontrado en la muestra analizada valores de entre veintidós y veinticinco, con una media redondeada a la unidad de veinticuatro. Lo cual, concluye sabiamente, equivale a tres BocaBytes. ¡Enhorabuena, Rafa! Te mando tu camiseta. Pero vamos a lo que vamos: se me ha ocurrido escribir sobre almacenamiento de información porque el otro día vi en una librería una felicitación electrónica, de esas que cuando las abres empieza a sonar el Cumpleaños Feliz. Y recordé que había leído en algún sitio que el poder de cálculo y la capacidad de almacenamiento de una de esas tarjetas son mayores que los de las computadoras de hace unas décadas. Entonces me dio por reflexionar sobre lo sorprendente que es que hayamos llegado donde hemos llegado, sobre todo si tenemos en cuenta los orígenes. Todos tenemos en mente la imagen de alguna película en blanco y negro de esos gigantes ordenadores que ocupaban una habitación entera y en los que los unos y ceros se representaban por válvulas, semejantes a grandes bombillas (pero bombillas de las de verdad, de las que se encendían cuando le dabas al interruptor y no cuando a ellas les parece bien). Y, sin embargo, las válvulas no fueron, ni mucho menos, los orígenes. Antes se había pasado por ingenios mecánicos fabricados con tecnología de la época

dorada del ferrocarril, que recordaban a aquellos preciosos artilugios que el Capitán Nemo llevaba en su submarino. Pero más sorprendente todavía fue el siguiente paso, cuando Alan Turing y compañía, en su afán por evitar los problemas de velocidad y fiabilidad inherentes a las computadoras mecánicas basadas en engranajes, idearon un sistema de almacenamiento basado en... ¡tubos de mercurio! Los ceros y los unos llegaban a un extremo del tubo, que medía en torno

ría, para repetir el proceso indefinidamente.

Sorprendentemente, aquello funcionaba, pero resultaba inviable para gestionar memorias más allá de un puñado de bits. La verdadera revolución llegó en la década de los sesenta y setenta del pasado siglo con la irrupción en la industria del transistor (inventado en 1947), que permitió aumentar drásticamente la capacidad de procesamiento y almacenamiento de los ordenadores, de acuerdo con la Ley de Moore. Como la confianza dasco y esta ley ya es como de la familia, no nos impresiona tanto, pero es

Claro, así hemos pasado de los pocos bits de las memorias de tubos de mercurio de Turing a los discos duros de kilobytes en los años ochenta, megabytes en los noventa y gigabytes en la década pasada, que ahora caben en un pen-drive más pequeño que un sello de correos (son esas cosas que se pegaban en sobres cuando no había e-mail, niños. Os lo habéis perdido, te dejaban chuparlos sin regañarte). Y ahora un disco duro de un ordenador normalito viene ya con terabytes, y los servidores distribuidos de grandes proyectos o buscadores trabajan con petabytes, nombre este tan absurdo que la mismísima señora esposa del que se lo inventó le pidió que lo cambiara por otro menos ridículo. A lo que él contestó: "no te preocupes, si esto no lo va a usar nadie". Y miranos ahora, llenando petabytes como quien come pipas en el cine. "Además, -añadió él- nadie se rio cuando inventé los Peta Zetas". Bueno, ¿y qué nos depara el futuro? Pues, según los expertos, varias revoluciones. Ordenadores cuánticos, en los que un bit (llamado aquí qubit) no solo puede ser 0 y 1, sino también pasar a un estado conocido como superposición coherente y tomar los dos valores a la vez. Tecnologías basadas en superconductores, que no solo incrementarán drásticamente la velocidad de procesamiento sino que también permitirán almacenar ingentes cantidades de información sin consumir apenas energía. Ordenadores biológicos, en los que se utilizarán organismos vivos o sus componentes para realizar cálculos computacionales. Como tantas otras veces en el campo de la tecnología, parece que la realidad va a superar la ficción.



a un metro y medio, en forma de impulsos eléctricos. Estos se convertían en ondas sonoras intermitentes que viajaban con relativa lentitud a través del mercurio hasta el otro extremo del tubo, donde se convertían de nuevo en impulsos eléctricos, que se volvían a dirigir a la entrada de la tube-

una verdadera burrada, porque establece empíricamente que desde hace casi cincuenta años, aproximadamente cada dieciocho meses se ha venido doblando el número de transistores en los circuitos integrados, con el consiguiente aumento en la capacidad de procesamiento y almacenamiento.

## la pregunta:

Sí, lo sé, normalmente la pregunta de un número sirve como introducción para el tema del número siguiente, pero es que tengo una buenísima sobre esto de lo que

hemos hablado en este artículo: ¿Cómo almacenarías la receta de las torrijas de tu abuela para estar seguro de que los nietos de los nietos de tus nietos podrán seguir tomándolas en Semana Santa?

### RESPUESTAS

- A) EN UN TROZO DE PAPEL, POR SUPUESTO.
- B) EN UNA CINTA MAGNÉTICA, POR SUPUESTO.
- C) EN UN DISCO DURO, POR SUPUESTO.
- D) EN UN PEN-DRIVE, POR SUPUESTO.
- E) EN LA NUBE, POR SUPUESTO.

# LAS NEBULOSAS PLANETARIAS

## Pilares científicos

A finales del siglo XVIII se estaban catalogando los objetos astronómicos de aspecto nebuloso, entre los que se encontraban unos de apariencia gaseosa y con una única estrella central. Por su parecido superficial con los planetas exteriores del Sistema Solar se los denominó nebulosas planetarias (NPs), aunque no existe relación entre ellas y los planetas.

Ahora se sabe que las NPs son una etapa evolutiva tardía de las estrellas de masa baja e intermedia, esto es, entre 0.8 y ocho veces la masa solar. El proceso general de formación de las NPs está razonablemente bien entendido dentro del contexto de la teoría de la evolución estelar. Las estrellas son enormes esferas de hidrógeno que, debido a su autogravitación, están sometidas a un proceso de contracción más o menos intenso en función de su masa. Las estrellas, durante la mayor parte de su existencia, generan energía a partir de reacciones de fusión nuclear del hidrógeno que se encuentra en su centro, que alcanza una temperatura de unos veinte millones de grados. Esta energía, en su camino hacia el

exterior de la estrella, produce una presión que se contrapone a la contracción gravitacional alcanzando un estado de equilibrio hidrostático. Típicamente, solo el 10% del hidrógeno de la estrella está disponible para la fusión y, más tarde o más temprano, el centro de la estrella comienza a llenarse de núcleos de helio; entonces el ritmo de las reacciones de fusión de hidrógeno decae y con él la producción de energía. Esto hace que la contracción gravitacional venza a la presión interna y la estrella se comprime. En este punto se dispara un proceso de autorregulación: la contracción gravitacional de la estrella aumenta la temperatura de su centro y, cuando alcanza los cien millones de grados, los núcleos de helio colisionan y se fusionan para formar carbono (e incluso oxígeno). Esta energía es suficiente para volver a hinchar la estrella, que alcanza un radio de varias decenas de millones de kilómetros. La enorme expansión de las capas externas las enfría, por lo que se vuelven más rojas. A esta fase de desarrollo se le llama estrella gigante roja. Mientras el núcleo estelar fusiona helio, la capa de hidrógeno inmediatamente por encima de este alcanza la temperatura necesaria para fusionarse, y cuando la

estrella tiene reacciones nucleares de manera simultánea en dos zonas distintas su producción energética se hace muy inestable. Esto provoca sucesivas rupturas del equilibrio hidrostático, lo que implica que la estrella pulse y, dado que sus capas más exteriores están sujetas muy débilmente por la gravedad, terminan por desprenderse.

Así pues, las NPs son estrellas que han expulsado sus capas externas dejando expuesto su núcleo. Este, que recibe el nombre de enana blanca, presenta un radio similar al de la Tierra, una temperatura superficial de varias decenas de miles de grados y emite intensamente en el ultravioleta. Dado que en el interior de la enana blanca han cesado las reacciones nucleares, no se trata propiamente ya de una estrella sino de un remanente. El material expulsado forma una envoltura de gas y polvo a su alrededor, que absorbe parte de la radiación ultravioleta y luego la reemite de maneras características que dependen del tipo de material y de sus condiciones físicas. El polvo una NP reemite la mayor parte de su energía en forma de radiación infrarroja mientras que el gas lo hace en la parte óptica del espectro.

Imagen de fondo, crédito de Julie Schmidt.



## Incertidumbres

En el caso ideal una estrella es un objeto con una simetría aproximadamente esférica, lo que implica una pérdida de masa y la formación de NPs en consecuencia. Pero la naturaleza real no es tan simple, y nos muestra una enorme riqueza y diversidad morfológica cuando de NPs se trata. La mayor parte de las NPs resueltas por los telescopios muestran simetrías distintas a la esférica: se observan NPs anulares, elípticas, bipolares, multipolares, helicoidales e irregulares. En la actualidad se trabaja intensamente en el esclarecimiento de las diversas morfologías de las NPs. Muchas

de las simetrías pueden explicarse por efectos de perspectiva a partir de una morfología real básica de tipo bipolar, similar a un diábolo. Para explicar la bipolaridad se han propuesto una gran diversidad de mecanismos, entre ellos la misma rotación de la estrella, la existencia de una estrella compañera, un sistema planetario o el efecto de campos magnéticos.

Parece haber una relación entre la masa de la estrella progenitora de la NP y la morfología, según la cual las estrellas menos masivas producen NPs esféricas y las más masivas generan NPs bipolares o en casos extremos irregulares, mientras que las elípticas corresponderían a estrellas de masa intermedia entre ambos extremos. Las

estructuras de tipo helicoidal y multipolar parecen estar relacionadas con la precesión del eje de rotación de la estrella central aunque aún se discute la razón de la precesión misma.

Con la mejora en las observaciones y la ampliación del espectro electromagnético empleado se han detectado estructuras más complejas (por ejemplo anillos, rayos, halos o grumos) incluso en las NPs que inicialmente se creían más simples. Hoy por hoy se busca de manera afanosa la explicación de estas estructuras y su dinámica. Las NPs representan una de las áreas más dinámicas y fascinantes de la astrofísica moderna y prometen aún la revelación de muchos secretos.

## RECOMENDADOS

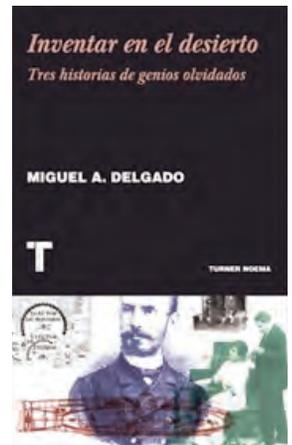
### “INVENTAR EN EL DESIERTO”. TRES HISTORIAS DE GENIOS OLVIDADOS

En Piedrabuena (Ciudad Real), hace ciento y pico años pasaban cosas muy raras: un tal Sánchez se fue a Estados Unidos y al volver montó en el pueblo una fábrica revolucionaria (porque fabricaba un aparato para ver a la gente por dentro y porque pagaba sueldos justos; una de estas dos cosas es revolucionaria todavía hoy). Por esos años cundió también la monomanía de diseñar y fabricar el submarino perfecto: con periscopio o sin él, a hélice o a brazo, para recuperar el imperio o para mariscar. La cosa, en el caso de Peral, Monturiol y otros, acabó en naufragio, aunque tuvieron a Julio Verne de su parte. No nos olvidamos tampoco de un sabio llamado Cervera que, hasta donde sabemos, es posible que inventara la radio. Y ya puestos a innovar, nada como lo de aquel señor cura de Segorbe (Castellón) que hacía música electrónica y diseñaba sintetizadores mientras Franco andaba por ahí bajo palio.

Ni santos, ni visionarios, ni locos: genios españoles. En medio de la nada, o en un país que los saludó como a reyes y los olvidó como a mendigos.

Con una historia que merece ser contada y leída... por aquello de conocer el pasado y repetirlo un poco menos.

Autor: Miguel A. Delgado



### LA FÍSICA DE PARTÍCULAS, ASTROPARTÍCULAS Y LA FÍSICA NUCLEAR EN NUESTRAS VIDAS

El proyecto Consolider-Ingenio CPAN (Centro Nacional de Física de Partículas, Astropartículas y Nuclear) presenta 'La física en nuestras vidas', una exposición itinerante que muestra al público los principales beneficios y desarrollos tecnológicos surgidos de la investigación básica.

Mediante imágenes y textos se muestra el nacimiento de la World Wide Web en el CERN, el desarrollo de técnicas de diagnóstico y terapia en Medicina o las aplicaciones de los aceleradores de partículas en energías renovables, industria o estudios sobre patrimonio artístico, entre otros ámbitos. La exposición comienza su andadura en el Museo de las Ciencias Príncipe Felipe de Valencia y visitará varias ciudades españolas en los próximos meses.



<http://www.i-cpan.es/contenidos/index.php/ExpoAplicaciones/ExpoAplicaciones>

### THE BIG VAN THEORY: CIENTÍFICOS SOBRE RUEDAS

¡Rayos cósmicos! ¿Bacterias que producen electricidad? ¡Las bacterias forman ejércitos! ¿Qué existe más allá de la genética? The Big Van Theory, La Teoría del Furgoneton, es un grupo de científicos investigadores de día, monologuistas científicos de noche, procedentes de diferentes campos: física, bioquímica, matemáticas... A través del género teatral del monólogo, estos científicos suben al escenario para divulgar, de forma entretenida y divertida, diversos temas y fenómenos de la ciencia. Un espectáculo para aprender y difractarse de risa. Pero hay mucho más: talleres, cursos de comunicación, monográficos... Súbete a la furgoneta de la ciencia con TheBigVanTheory.



<http://www.thebigvantheory.com/>

### 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)).

