

IAA

58

JULIO DE 2019
revista.iaa.es

Información y actualidad astronómica

Revista de divulgación del Instituto de Astrofísica de Andalucía

La primera imagen de un agujero negro



Imagen: First M87 Event Horizon Telescope Results
(Astrophysical Journal Letters Vol. 875)

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

Este número ha contado con el apoyo económico de la Agencia Estatal de Investigación (Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades) a través de la acreditación de Centro de Excelencia Severo Ochoa para el Instituto de Astrofísica de Andalucía (SEV-2017-0709).

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

Copyright: © 2018 CSIC. Esta es una revista de acceso abierto distribuida bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Instituto de Astrofísica de Andalucía, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Excelencia Severo Ochoa 07/2018 - 07/2022

NIPO: 694-19-060-5
Depósito legal: GR-605/2000
ISSN: 1576-5598

SUMARIO

Fotografiando lo invisible ...	3
De Sevilla a Cádiz por Granada: el IAA ...	7
Ciencia en historias. Nuestra primera astrónoma ...	11
Deconstrucción. Impactos en la Luna ...	22
El Moby Dick de... Romano Corradi (IAC/GTC)...	14
Actualidad ...	15
Sala limpia. Sondas encantadoras, <i>rovers</i> adorables ...	18
Pilares e incertidumbres. Zonas de habitabilidad galáctica ...	19
Proyecto PIISA ...	20



CONCURSO DEL OBSERVATORIO DE CALAR ALTO

El Concurso Internacional de Astrofotografía, Timelapse y Dibujo Astronómico de Calar Alto consolidaba en su cuarta edición su carácter internacional con la presentación de trabajos enviados desde Francia, Australia, Estados Unidos, Irlanda y Tailandia. Arriba, la fotografía ganadora en la categoría de paisaje, de Antonio Martín Carrillo.

Galería de ganadores e información sobre el concurso: www.caha.es

Fotografiando lo invisible

PRIMERA IMAGEN DE UN AGUJERO NEGRO

RELATO DE CÓMO SE OBTUVO UNA IMAGEN ICÓNICA, VISTA POR MÁS DE CUATRO MIL QUINIENTOS MILLONES DE PERSONAS

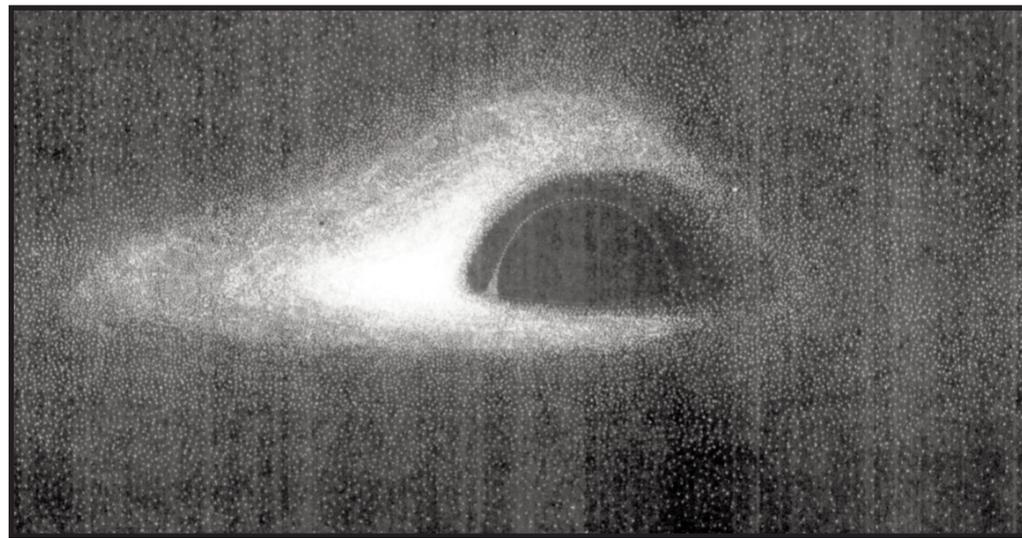
José Luis Gómez (IAA-CSIC)

El 10 de abril de 2019 se presentaba la primera imagen directa de un agujero negro tomada con el Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT, de su nombre en inglés), con la que los agujeros negros han pasado de ser un ente matemático predicho por la teoría de la relatividad a objetos reales que pueden ser estudiados a través de repetidas observaciones astronómicas*.

LA SOMBRA DE UN AGUJERO NEGRO

Los agujeros negros son los objetos más exóticos que predice la teoría de la relatividad de Einstein. En ellos la gravedad es tan alta que la curvatura del espaciotiempo que producen da lugar a un “agujero” en el propio universo. Este agujero, o singularidad, está rodeado por una región denominada horizonte de sucesos en la que ni siquiera la luz puede escapar, y de ahí que sean “invisibles”, o negros. Nada impide que crucemos el horizonte de sucesos, pero nunca podríamos volver para contar lo que hemos visto, por lo que el horizonte de sucesos es una puerta de salida sin retorno de nuestro universo.

Observar un agujero negro es por tanto una



Primera simulación de la sombra de un agujero negro donde se puede distinguir el anillo de luz aumentado rodeado por una imagen aumentada del disco de acrecimiento. El efecto Doppler relativista hace que un lado del disco, el que contiene material moviéndose en una dirección más cercana a la del observador, sea más brillante. Fuente: Luminet, 1979.

tarea complicada, ya que solo es posible distinguir su silueta proyectada sobre un fondo de radiación –la denominada sombra de un agujero negro–. Para un observador lejano, el agujero negro capta todos los fotones que se acerquen con un parámetro de impacto inferior a $R_c = \sqrt{27}R_s/2$, siendo $R_s = 2GM/c^2$ el radio de Schwarzschild. Los fotones con un parámetro de impacto mayor escapan al infinito, pero aquellos con un valor igual a R_c quedan capturados en una órbita inestable dando lugar a lo que se conoce como anillo de luz aumentado.

Los agujeros negros son voraces devoradores de cualquier material que se encuentre a su alrededor, y es por tanto común que se encuentren rodeados de un disco de acrecimiento. En este caso es más sencillo observar la sombra de un agujero negro, ya que el anillo de luz aumentado se verá envuelto de un halo de emisión procedente del disco de acrecimiento, como muestra la imagen superior, correspondiente a la primera simulación de la sombra de un agujero

negro realizada por Jean-Pierre Luminet en 1979. En un alarde de predicción asombroso, Luminet escribía en su artículo de 1979: “Por lo tanto, nuestra imagen podría representar muchas fuentes relativamente débiles, como por ejemplo el agujero negro supermasivo cuya existencia en el núcleo de M87 se ha sugerido recientemente”. Cuarenta años después, el Telescopio del Horizonte de Sucesos tomaba la primera imagen de la sombra de un agujero, precisamente en M87.

TELESCOPIO DEL HORIZONTE DE SUCESOS

Como hemos visto, el tamaño de la sombra de un agujero negro es directamente proporcional a su masa, y por tanto el tamaño

* Los resultados del EHT se presentaron en un número especial de seis artículos publicados en *Astrophysical Journal Letters*, bajo el título *First M87 Event Horizon Telescope Results (Vol. 875)*. De no estar indicado de otro modo, las imágenes de este artículo pertenecen a esas publicaciones.



TELESCOPIO DEL HORIZONTE DE SUCESOS (EHT)

Antenas que conforman el EHT. Todas ellas, excepto la antena del Polo Sur (que por su localización es incapaz de observar M87), participaron en las observaciones de abril de 2017 que proporcionaron la primera imagen de un agujero negro. Fuente: EHT.



aparente en el cielo viene dado únicamente por la razón entre su masa y distancia. Esto hace que los agujeros negros de tamaño estelar que nos podemos encontrar por ejemplo en binarias de rayos X tengan un tamaño aparente diminuto, inferior al nanosegundo de arco, algo completamente imposible de fotografiar con la tecnología actual. Sin embargo, en el centro de toda galaxia nos podemos encontrar agujeros negros supermasivos, con masas de millones o miles de millones de veces la del Sol.

En el caso de M87, estimaciones previas establecían una masa para el agujero negro central de entre 3.3 y 6.2 miles de millones de masas solares, de modo que teniendo en cuenta que se encuentra a una distancia de unos diecisiete megapársecs nos da un tamaño aparente para la sombra del agujero de entre unos veinte y cuarenta microsegundos de arco. De manera similar, en el centro de nuestra galaxia tenemos un agujero negro de 4.1 millones de masas solares, unas mil veces inferior a la masa de M87, pero se encuentra también unas mil veces más cerca, dando un tamaño aparente para la sombra del agujero negro de unos cincuenta microsegundos de arco. Fotografiar uno de estos agujeros requiere por tanto un instrumento capaz de proporcionar imágenes con una resolución angular del orden de unos veinte microsegundos de arco y a una longitud de onda lo suficiente corta como para que la emisión que rodea al agujero negro sea ópticamente delgada, algo que por primera vez empezó a ser accesible en 2017 gracias al desarrollo del Telescopio del Horizonte de Sucesos.

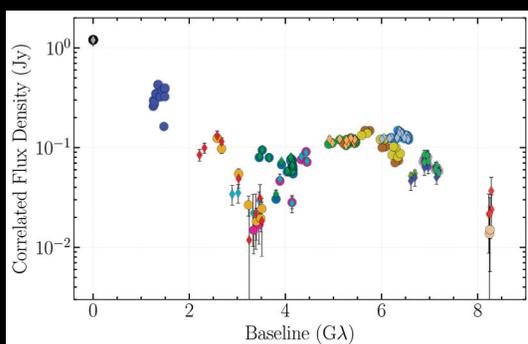
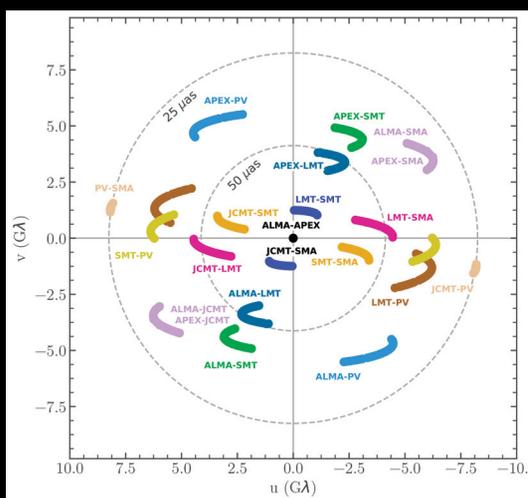
El EHT es un conjunto de antenas repartidas por toda la superficie terrestre que operan a longitudes de onda milimétricas. Gracias a la técnica de interferometría de muy larga base (VLBI por sus siglas en inglés), el Telescopio del Horizonte de Sucesos es capaz de sintetizar una antena virtual con un tamaño equivalente igual al diámetro de la Tierra, permitiendo alcanzar resoluciones angulares del orden de unos veinte microsegundos de arco.

Las observaciones del Telescopio del Horizonte de Sucesos de 2017 suponen la culminación de años de desarrollo instrumental por parte de numerosas instituciones repartidas por todo el mundo que engloban a los más de doscientos investigadores que conforman el consorcio del Telescopio del Horizonte de Sucesos. De hecho, como su propio nombre indica, fue desarrollado con el único propósito de convertirse en el primer instrumento capaz de fotografiar el horizonte de sucesos de los agujeros negros. Para ello ha sido necesario equipar las distintas antenas que conforman el EHT con nuevos receptores capaces de sintetizar un ancho de banda órdenes de magnitud mayor que los usados generalmente en observaciones de VLBI, y conseguir que las antenas de ALMA participen como una única antena en la red del EHT.

FOTOGRAFIANDO LO INVISIBLE

El EHT es un instrumento de una complejidad tal que solo realiza observaciones durante una ventana de unos diez o doce días al año, generalmente entre marzo y abril, cuando las condiciones atmosféricas son más propicias en las distintas localizaciones que conforma esta red interferométrica. Durante la campaña de observación del 2017 el EHT observó numerosas fuentes, entre ellas sus dos objetivos principales, M87 y SgrA*, esta última correspondiente a la radiofuente compacta en el centro de nuestra galaxia. En particular, el EHT realizó cuatro observaciones completamente independientes de M87 los días 5, 6, 10 y 11 de abril de 2017.

Las gráficas de la izquierda muestran el cubrimiento del plano uv (que marca las frecuencias espaciales muestreadas por el instrumento) correspondiente a las observaciones de 2017, así como los valores de densidad de flujo correlacionado. La densidad de brillo en el plano del cielo, es decir, la imagen final del interferómetro, y las visibilidades obtenidas están relacionadas por una simple transformada de Fourier. Un vistazo a estas figuras por un

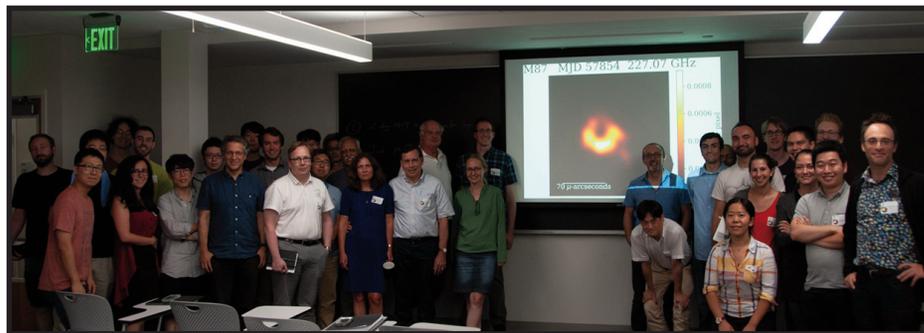


Cubrimiento del plano uv (agregado durante los cuatro días de observaciones) de M87 en la campaña de observaciones del EHT de 2017. [abajo] Amplitud de las visibilidades (densidad de flujo correlacionado) en función de la longitud de la línea de base correspondientes a las observaciones del EHT de M87 en abril de 2011.

ojo entrenado muestra que el doble mínimo observado en la amplitud de las visibilidades observadas es una clara indicación de la existencia de un anillo de emisión. Sin embargo, el EHT solo es capaz de muestrear un número limitado de frecuencias espaciales, y por tanto en la práctica existe un número infinito de imágenes compatibles con los datos obtenidos. Reconstruir la imagen final del EHT es un reto parecido a recomponer una sinfonía cuando solo puedes escuchar un número limitado de notas –has de rellenar los espacios, pero al igual que nuestro oído es capaz de seleccionar qué notas hacen que una sinfonía sea melodiosa, podemos rellenar estos espacios con información apropiada al problema al que nos enfrentamos. Por ejemplo, sabemos que la emisión ha de ser positiva, y tener unos gradientes suaves como corresponde a imágenes astronómicas.

Para evitar cualquier sesgo relacionado con la reconstrucción de la imagen se han utilizado distintos algoritmos de reconstrucción de imagen. Uno de ellos está basado en el algoritmo CLEAN usado tradicionalmente en interferometría, que permite deconvolucionar los efectos asociados con el limitado cubrimiento del espacio de frecuencias (plano uv) para reconstruir una imagen final como una colección de fuentes puntuales convolucionadas con la gaussiana que representa la respuesta del instrumento. Por otro lado, se han desarrollado otros dos algoritmos (eht-library y SMILI) basados en métodos de máxima similitud regularizados, que buscan cuál es la imagen que mejor se ajusta a los datos observacionales a través de argumentos probabilísticos. Estos métodos son además capaces de reconstruir imágenes basadas únicamente en datos no afectados por errores instrumentales, como son las clausuras de fase y amplitud.

Con el fin de evitar aún más si cabe cualquier sesgo relacionado con los criterios subjetivos de cada observador en la reconstrucción de la imagen, el análisis de los



Instantánea en la que se muestra por primera vez la imagen de la sombra del agujero negro en M87 durante el 2nd EHT Imaging Workshop celebrado en la Universidad de Harvard.

datos iniciales del EHT se llevó a cabo por cuatro grupos distintos de trabajo que, de manera completamente independiente y sin comunicación durante siete semanas, procedieron a la obtención de las primeras imágenes. El 24 de julio de 2018 estos grupos de trabajo presentaron sus primeras imágenes de M87 en el *2nd EHT Imaging Workshop* celebrado en el *Black Hole Initiative* de la Universidad de Harvard, todas ellas mostrando el anillo de luz aumentado que caracteriza a la imagen de la sombra del agujero negro en M87.

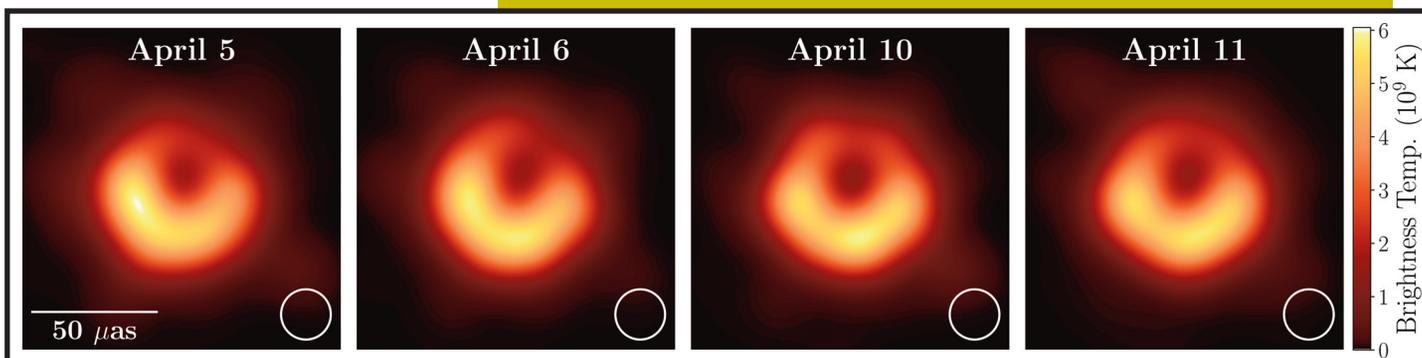
Cada uno de los algoritmos empleados, Difmap (usando la técnica de CLEAN), eht-imaging y SMILI tiene sus propios parámetros que determinan la reconstrucción final de la imagen, como por ejemplo el campo de visión o las zonas en las que se espera encontrar emisión. Por tanto, se procedió a un barrido completo del espacio de parámetros realizando un total de cerca de cincuenta mil imágenes, buscando qué combinación se ajustaba mejor a los datos obtenidos de M87 y a una serie de datos sintéticos correspondientes a cuatro modelos sencillos conocidos (anillo, media luna, disco, y fuente doble). Estos parámetros finales se emplearon para reconstruir las imágenes de M87 correspondientes a los cuatro días de observación de 2017.

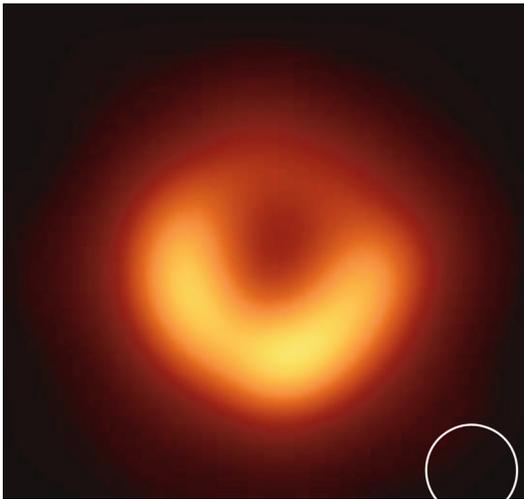
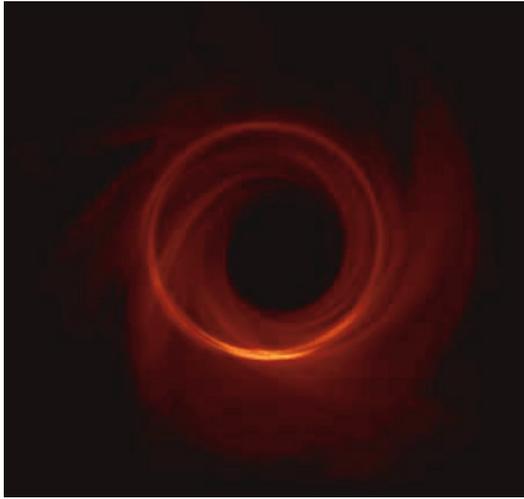
EL AGUJERO NEGRO EN M87

Las imágenes inferiores nos muestran por primera vez la sombra de un agujero, tal y como fue capturada por el Telescopio del Horizonte de Sucesos en sus observaciones de 2017. Todas ellas muestran una estructura muy similar durante los cuatro días de observación, confirmando la robustez de los resultados. En ellas podemos apreciar el anillo de luz aumentado que envuelve una región central más oscura asociada con la captura de fotones por parte del horizonte de sucesos.

En las imágenes podemos apreciar que el anillo de luz aumentado es más brillante en la zona sur, debido al efecto Doppler relativista que caracterizaba también la simulación de Luminet. Esto nos ha permitido determinar que el material en estas últimas órbitas más cercanas al horizonte de sucesos gira en el sentido de las agujas del reloj, con la región del sur moviéndose en una dirección más cercana a la visual y el vector de spin del agujero negro en M87 apuntando en dirección opuesta a la Tierra. La imagen de M87 con el EHT concuerda por tanto con las predicciones que tenía-

Imágenes de M87 obtenidas con el Telescopio del Horizontes de Sucesos los días 5, 6, 10, y 11 de abril de 2017. Cada imagen se ha obtenido como la media de las imágenes reconstruidas con los algoritmos de Difmap, eht-imaging y SMILI. Todas las imágenes muestran de manera consistente la sombra del agujero negro en M87, caracterizada por un anillo de luz, más brillante en el sur, que envuelve una región más oscura central correspondiente a la captura de fotones por el horizonte de sucesos.





Arriba, simulación numérica GRMHD de un agujero negro con un spin de 0.94 rodeado por un disco de acrecimiento de alta magnetización, y (debajo) la imagen simulada que habría captado el EHT en sus observaciones de 2017.

mos sobre la sombra de un agujero negro, pero un estudio más detallado de su concordancia con las predicciones concretas de la teoría de la relatividad requiere de su comparación con simulaciones magnetohidrodinámicas relativistas (GRMHD) y emisión en modelos de transporte radiativo con trazado de rayos en relatividad general (GRRT). De esta manera podemos simular imágenes sintéticas de agujeros negros con distinta masa y spin, y distintos modelos para el disco de acrecimiento que lo envuelve, en particular su nivel de magnetización.

Más de sesenta mil imágenes distintas de agujeros negros y sus discos de acrecimiento se han generado para la interpretación de las observaciones de M87 con el EHT, lo que constituye la mayor librería de simulaciones GRMHD+GRRT obtenida hasta la fecha. Estas imágenes se han utilizado a su vez para generar datos sintéticos (visibilidades interferométricas) reproduciendo las características observa-

ciones del EHT durante sus observaciones en 2017. Los datos sintéticos se han procesado usando los mismos algoritmos de reconstrucción de imagen empleados en la obtención de la imagen de M87, permitiendo de esta manera una comparación directa entre las imágenes reales y las simuladas.

A la izquierda se muestra una de estas simulaciones GRMHD y la imagen esperada que habría captado el EHT en sus observaciones de 2017. Su similitud con las imágenes reales de M87 mostradas en la página anterior es realmente extraordinaria.

Como hemos visto antes, el tamaño del anillo de luz aumentado de un agujero negro de Schwarzschild viene determinado únicamente por la razón entre su masa y distancia. En el caso de un agujero negro en rotación (agujero de Kerr), este tamaño se ve ligeramente modulado en un factor inferior al 4% por su spin. Por tanto, conocida la distancia es posible determinar el tamaño del agujero negro simplemente a través de una medida del tamaño del anillo de luz aumentado.

Análisis de las imágenes y los datos interferométricos de M87 nos han permitido determinar un tamaño para el anillo de luz aumentado de cuarenta y dos microsegundos de arco, y por tanto obtener una masa para el agujero negro de M87 de $(6.5 \pm 0.7) \times 10^9$ masas solares. Esta estimación concuerda plenamente con la obtenida a partir de las estimaciones de la dispersión de velocidades estelares en la región central de M87, proporcionando la confirmación de que la sombra del agujero negro en M87 observada por el EHT concuerda plenamente con la teoría de la relatividad de Einstein para un agujero negro de 6.5 miles de millones de veces la masa del Sol situado a unos cincuenta y cinco millones de años luz de la Tierra. Esto pone también en relieve la importancia de la imagen obtenida por el EHT, en la que una medida del tamaño del anillo de luz nos permite determinar la masa del agujero negro central en M87.

Por otro lado, estas observaciones confirman por primera vez de manera directa que los agujeros negros supermasivos son los responsables de las enormes cantidades de energía liberadas en el centro de las galaxias activas, como la de M87.

UN LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE LA GRAVEDAD

En la campaña de observación del 2017 el EHT observó también de manera repe-

tida SgrA*, la radiofuente compacta en el centro de nuestra galaxia donde sabemos que existe un agujero negro de 4.1 millones de veces la masa del Sol. El análisis de estos datos es particularmente complicado dado que SgrA* varía en escalas temporales de decenas de minutos, por lo que es necesario el desarrollo de nuevos algoritmos de reconstrucción de imagen que nos permitirán en un futuro cercano obtener una película, en vez de una única imagen, del agujero negro en el centro de nuestra galaxia.

Futuras observaciones de M87, incluyendo nuevas antenas en 2020, nos permitirán por primera vez establecer la conexión entre el agujero negro central y el chorro (o *jet*) que hemos podido observar en M87 desde hace más de un siglo. Este chorro de partículas subatómicas, que viaja a velocidades próximas a la de la luz, se extiende hasta distancias mucho más grandes que el tamaño de la propia galaxia, y son típicos en galaxias que muestran una gran actividad nuclear. Las observaciones del EHT nos permitirán, por primera vez, entender cuáles son los mecanismos de formación, colimación y aceleración de estos chorros relativistas, zanjando por fin una cuestión que venimos investigando durante hace ya más de cuarenta años.

La imagen de la sombra del agujero negro en M87 obtenida por el Telescopio del Horizonte de Sucesos supone un punto de inflexión en el estudio de los agujeros negros, haciendo que estos pasen de ser un ente matemático predicho por la teoría de la relatividad a objetos reales que pueden ser estudiados con repetidas observaciones astronómicas.

El EHT es un instrumento en continua evolución, en la que mejoras tecnológicas en los receptores y, más aún, la inclusión de nuevas antenas tanto en tierra como en órbita en torno a la Tierra permitirán en los próximos años y décadas obtener imágenes cada vez más nítidas del agujero negro en M87, de SgrA* y de otros agujeros negros supermasivos en galaxias cercanas. Por tanto, no hay límites en cuanto a las posibilidades que ofrece el EHT para el estudio de los agujeros negros, más allá de las propias limitaciones económicas. Esto nos permitirá por primera vez poner a prueba la teoría de la relatividad en situaciones de gravedad extrema, y quizá obtener las respuestas que permitan compaginar la teoría de la relatividad general y la mecánica cuántica.

Iniciamos con este reportaje una sección que hará hincapié en las actividades, historia y proyectos del Instituto de Astrofísica de Andalucía. Si en el número anterior José María Quintana relataba cómo fue posible fundar el centro, aquí revisamos los primeros y excitantes inicios de la mano de uno de sus primeros doctorandos

De Sevilla a Cádiz por Granada: el IAA

CÓMO UN CENTRO DE INVESTIGACIÓN JOVEN ATRAJO TALENTO, INCONFORMISMO Y CREATIVIDAD

Emilio J. Alfaro (IAA-CSIC)

A finales del verano de 1976 estábamos Manolo Sáez Cano y yo parados frente al imponente portal de uno de los monumentos con más historia de la ciudad de Granada: la Madraza. Llamamos, se abrió el portillo y apareció un señor que, con un acento norteño, nos preguntó qué queríamos.

- ¿Es este el Instituto de Astrofísica de Andalucía? Hemos terminado Física en Sevilla y estamos buscando trabajo -respondimos al unísono con el aplomo que la ocasión requería.

- Aquí hay trabajo, pero no hay dinero -contestó nuestro interlocutor más rotundo aún. Acabábamos de conocer a José María Quintana y cruzábamos, sin la menor conciencia de ello, el umbral de otro mundo.

Quintana tenía razón, había trabajo pero no dinero. Sin embargo no creo que me haya sentido nunca más libre y más rico que en aquellos años que conformaron mi formación científica y personal al amparo de un grupo de visionarios que nos sacaron adelante, no sin dar alguna coza contra el aguijón. Allí estaban, junto a José María Quintana, Ángel Rolland, Pilar López de Coca, Eduardo Battaner, Víctor Costa, Rafa Garrido, Rafa Rodrigo, Juanjo (hoy



El palacio de La Madraza, primera sede del IAA

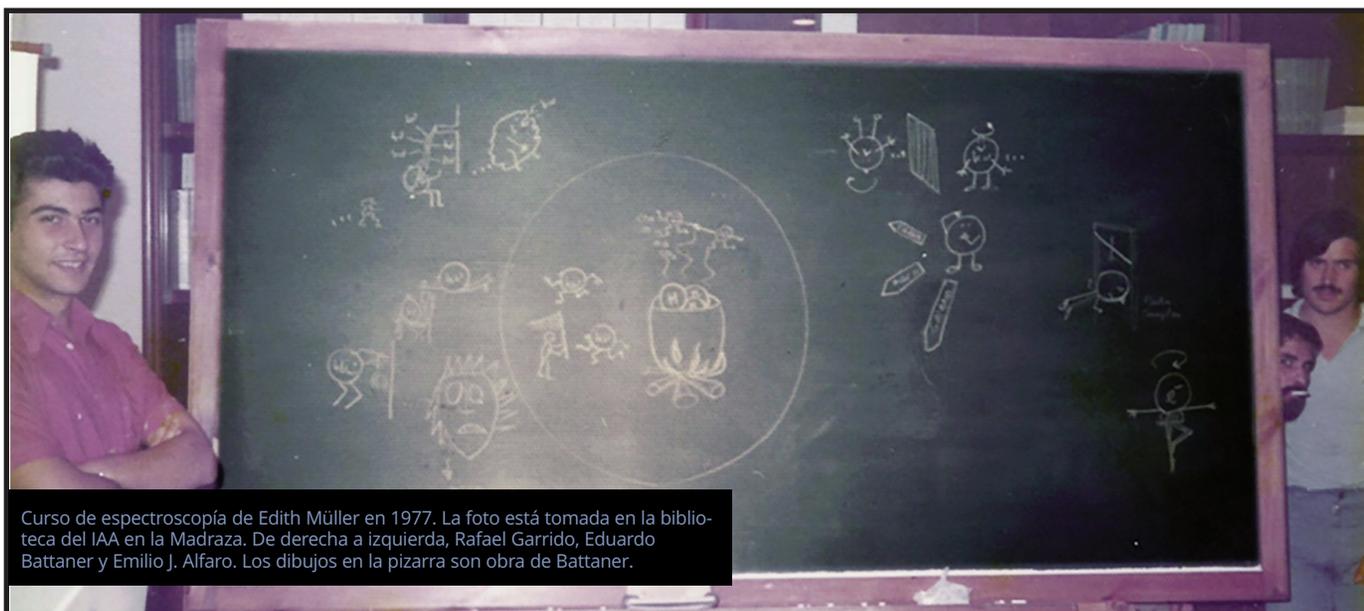
Yusuf) y el hermano Merlo. Las ausencias guardadas de Pepe Juan, Lorenzo, Antonio Delgado y Mercedes Prieto se referían con cierta veneración. Pepe Juan y Lorenzo estaban en Canadá con lo del cohete, Antonio en Alemania, haciendo la tesis sobre modelos estelares y Mercedes, que con solo un año en el IAA ya se había hecho un sitio en nuestro particular parnaso, se había marchado definitivamente a Canarias para iniciarse en la observación infrarroja. A ellos se unía un grupo de amigos que representaban la segunda esfera de coordinación, visto desde nuestro actual punto de vista, pero que en aquel momento eran indistinguibles de cualquiera de nosotros: Miguel Giménez Yanguas, Nicolás Pérez de la Blanca, “Curro” Verdegay, Javier Algarra, un etólogo cuyo nombre no recuerdo, y cualquier otro que hubiera oído hablar del IAA y sintiera curiosidad por conocer qué era aquello.

Sí, formábamos un grupo joven y heterogéneo que funcionaba como *atractor* de las

inquietudes científicas y personales de un buen número de inconformistas que incorporaron la ciencia a la ola de ilusiones que el final de la dictadura había generado.

Ángel dirigía el grupo de Estrellas Variables, Eduardo, el de Atmósfera de la Tierra (o Aeronomía) y Jose, el boliche completo. Si no recuerdo mal, en el otoño del 76 solo Eduardo y Jose eran doctores y Ángel defendió la tesis en el 77. Ninguno tenía plaza fija en aquel momento y Eduardo era profesor no numerario de la Universidad. Éramos una fluctuación cuántica del vacío, algo que, según el momento en que lo observaras, existía o no. Una camada de gatos de Schrödinger.

Las crisis existenciales nos sobrevenían muy a menudo, a veces varias al día. Cuando esto ocurría el hermano Merlo nos convocaba despacho por despacho para acabar todos reunidos en la estupenda sala



Curso de espectroscopía de Edith Müller en 1977. La foto está tomada en la biblioteca del IAA en la Madraza. De derecha a izquierda, Rafael Garrido, Eduardo Battaner y Emilio J. Alfaro. Los dibujos en la pizarra son obra de Battaner.

situada frente al Salón de Caballeros XXIV o en la biblioteca, también localizada en el piso superior, donde hoy se halla otro salón de conferencias. Estos cónclaves eran un proceso cíclico, un eterno retorno doméstico: Quintana entraba con semblante serio, exponía la amenaza que sufríamos en aquel preciso instante y comenzaba una rueda de preguntas. Si eras el primero en ser preguntado, malo, tu respuesta solía tener dos réplicas bien diferenciadas: una entrañable regañina, donde se ponía de manifiesto tu ignorancia sobre los graves problemas que nos acechaban y tu falta de solidaridad con el grupo, o una críptica salida del tipo: “No, no, no, cuidado, lo que está diciendo Fulanito no es ninguna tontería”. El siguiente en responder, salvo que tuviera el día masoca, optaba por una formulación diferente de la no tontería que había dicho Fulanito, y así continuaba el rondó. No sé qué papel jugó esta asamblea intermitente en el desarrollo del IAA, si fue una medicina o un placebo, pero Quintana, Quintanilla y Quintanillilla¹ lograron sacarlo adelante. Y, bueno, aquí estamos. Nuestros puntos fuertes eran el hermano Merlo, el observatorio del Mojón del Trigo, una biblioteca incipiente, pero correcta, Pilar, la *yenka* trinchada y la *jayuya* tostada, y una suerte de deportes *indoor* que la maravillosa arquitectura de la Madraza y nuestra particular visión del *mens sana in corpore sano* nos animaron a desarrollar y practicar. Teníamos una bicicleta pequeña, un cronómetro y una sala hipóstila: el esalon estaba servido. La escalera, de gran anchura, permitía la bajada simultánea de varios partici-

Formábamos un grupo heterogéneo que funcionaba como atractor de las inquietudes que el fin de la dictadura había generado

pantes a pie cojito, lo que llevó a más de uno a asomarse, e incluso a arrojarse, al abismo. Pero la prueba estrella, donde todo el mundo daba el do de pecho, era el salto a la columna. De mecánica fácil, pero de práctica endiablada, la prueba consistía en dar un salto adelante y hacia arriba que permitiera al jugador colgarse de la columna cuanto más alto mejor y permanecer así el mayor tiempo posible sin que los pies tocaran el suelo. La fisonomía del atleta sufría una metamorfosis indescriptible cuando las fuerzas flaqueaban y el frío y terso mármol hacía inútiles los intentos de permanecer agarrado. La visión de un nativo en postura simiesca con un marcado rictus de dolor y determinación, jaleado por una tribu vociferante de fanáticos, debe permanecer en las pesadillas de aquellos turistas que, distraídamente, abrieron la puerta de la Madraza y se encontraron de cara al estilista². Esta era nuestra oficina a finales de los setenta: a este respecto los de Google no han inventado nada.

LA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA COMO PRUEBA DE RESISTENCIA

El invierno de 1977 comencé a observar en el Mojón del Trigo. Ángel Rolland, Pilar López de Coca, Víctor Costa, Rafa Garrido, Manolo Sáez y José Antonio Quesada eran los compañeros habituales de observación nocturna (no todos a la vez). Ya se han contado muchas historias acerca de este observatorio, y quizás merezca un cronista con mejores credenciales que yo para dejar constancia de la importancia del mismo en el desarrollo del IAA y en la formación de su primera hornada de astrónomos. Como ya se ha dicho en diferentes ocasiones, no había agua corriente, el servicio era amplio y con vistas, y el invierno te ofertaba un *peeling* gratuito y estimulante cuando te lavabas la cara con las aguas de la Hoya de la Mora. Pero el telescopio, el fotómetro y su salida analógica eran excelentes, y Ángel Rolland nos enseñó cómo preparar una noche de observación y llevarla a cabo con éxito. Con estos datos defendí mi tesina en la Universidad de Sevilla en el otoño de 1977 sobre la variabilidad de la estrella EH Lib.

Ese mismo verano pasé un mes en Madrid tomando contacto con lo que sería mi trabajo de doctorado bajo la tutela de José Manuel García-Pelayo, mi flamante director de tesis junto a José María Quintana. Pepe, como se le conoce entre los amigos, parecía tener una particular manera de formar a sus discípulos: la primera prueba que tuve que superar fue de resistencia física. Quien haya conocido el departamento de Astrofísica de la Universidad Complutense de Madrid a

1. Esta nomenclatura se debe a Eduardo Battaner, quien no desaprovechaba una ocasión de hacer un mal juego de palabras. Los tres citados son José María Quintana González, Ángel Rolland Quintanilla y el propio Eduardo.

2. El zaguán de la Madraza estaba limitado por dos puertas; el portillo exterior casi siempre estaba abierto y el interno, que separaba el propio zaguán del patio de columnas, permanecía cerrado, pero sin llave.

finales de los 70 sabrá que en el tejado de la Facultad de Física, al lado de la cúpula que albergaba un pequeño telescopio, había unos habitáculos que servían como laboratorios y despachos auxiliares (sic) del mencionado departamento. La temperatura en el interior de estos zulos superaba los cincuenta grados centígrados a partir de las diez de la mañana del agosto madrileño. Allí comencé mi doctorado, más cerca de “Papillon” que de “Cosmos”. Durante un mes leí tres largos artículos para familiarizarme con las que serían mis nuevas herramientas de observación astronómica. Uno titulado “*Photographic Photometry*”, y otros dos sobre el sistema fotométrico RGU, donde se dirimían las propiedades del sistema, su calibración y medida. Yo aprovechaba las numerosas dudas que me planteaban estas lecturas para bajar al oasis de Pepe y tomar aire. Por lo visto, superé los estándares, es decir, sobreviví, y después de defender la tesina volé a Basilea para mi primera estancia de trabajo en el extranjero³.

La tesis formaba parte de un gran proyecto del Instituto de Astronomía de la Universidad de Basilea (Suiza), pensado para determinar la estructura de la Vía Láctea a partir del conteo estelar. El programa científico era básicamente el mismo que había propuesto William Herschel casi dos siglos atrás, pero apoyado por el inflacionario desarrollo de la astrofísica que había tenido lugar desde entonces. El sistema fotométrico RGU, diseñado y desarrollado por Wilhelm Becker, permitía la separación entre enana y gigante, y entre Población I y II, a la vez que proporcionaba una clasificación espectral y una estimación de la variación de la absorción interestelar con la distancia, siempre y cuando se trabajara con campos estelares bien poblados como para poder inferir conclusiones estadísticamente significativas. La fotometría RGU permitía una mejor determinación de las variables físicas estelares que el UBV, sin embargo el sistema UBV está hoy en día ampliamente extendido, mientras que el RGU lleva prácticamente en desuso más de dos décadas. Hay varias razones que explican esta deserción: la placa fotográfica es un detector perverso a la hora de calibrar la fotometría, y no se ha construido un conjunto de estrellas estándares en el RGU que obviara el paso de la transformación entre sistemas fotométricos.



Verano de 1978. Excursión a la cumbre del Veleta con motivo del curso de Fotometría impartido por el Prof. Uli Steinlin (Instituto de Astronomía de la Universidad de Basilea). De derecha a izquierda y de delante a atrás: 1ª fila; Eduardo Simmoneau (Observatorio de París). 2ª fila; Emilio J. Alfaro (IAA), Uli Steinlin (Universidad de Basilea), Sebastián Vidal (IAA), Ángel Rolland (IAA) y Eduardo Battaner (IAA-UGR). 3ª fila; Mamen Morales (INTA), Lola Sabau (INTA) y Pepe García-Pelayo (UCM). Nótese la colleja que mi director de tesis está a punto de propinarle a mi director de tesina.

A lo largo de la tesis visité el Instituto de Astronomía de la Universidad de Basilea en tres ocasiones, con una duración promedio de tres meses por estancia. Si los prolegómenos de la tesis me habían endurecido físicamente, las visitas a Basilea desarrollaron mi parte zen. Vivía en el propio observatorio, que estaba situado en la calle Venus, junto a un cementerio y unos manzanales perpetuamente cubiertos de cuervos. La rutina matinal comenzaba con un grito que imitaba el graznido del grajo y con el conteo de cuántos pajarracos había aventado. Era una sugerencia del director de tesis y no podía echarla en saco roto. Después del desayuno bajaba al sótano y comenzaba a medir la emisión luminosa de las estrellas a partir de la densidad de granos de plata que se habían depositado en una emulsión fotográfica. El campo estelar que se me había asignado estaba en la región de Carina, cerca del cúmulo IC 2581, casi tangente al brazo espiral del mismo nombre y, por lo tanto, en una región muy poblada de la Galaxia. Cada placa contenía unas dos mil estrellas y tenía cinco placas por filtro. El fotómetro Iris, desarrollado y construido por el propio observatorio, tenía una mecánica simple y eficiente que requería la división de un haz de luz en dos rayos de igual intensidad, uno que pasaba a través de la estrella y otro a

través de un diafragma móvil (iris), cuyo diámetro podía variar. Cuando ambos volvían a alcanzar la misma intensidad luminosa, se anotaba el diámetro del iris como medida indirecta del brillo de la estrella. Las medidas se anotaban a mano en unos pliegos de papel confeccionados por el instituto, y con las cabeceras y epígrafes en alemán. Treinta mil medidas realizadas y anotadas a mano en una habitación a oscuras solo iluminada por la fuente de luz del fotómetro representan una excelente gimnasia mental, si te queda mente que entrenar. La tesis me familiarizó con la fotometría como técnica y como fuente de información de las propiedades físicas de las estrellas, me introdujo en la física de la Galaxia y dirigió mis primeros pasos hacia la estadística estelar, conocimientos que siempre me han acompañado y que acabaron de urdir el primer armazón de mi formación astronómica.

NUEVA SEDE DEL IAA

Todavía hay colegas que me lo echan en cara, pero el viaje a Suiza del otoño del 78 me impidió participar en la mudanza de la Madraza a la Casa Blanca de la Estación Experimental del Zaidín (EEZ), que nos acogió como a hijos pródigos⁴ hasta que en 1986 se inauguró el edificio que hoy ocupa nuestro instituto. En 1979 el IAA parecía

3. En el otoño del 77, el mundo se dividía en dos, aquí (España) y el extranjero, y hasta entonces no había sido fácil salir al extranjero para la mayoría de los habitantes de aquí.

4. Manuel Romero Álvarez (gerente del IAA de 1979 a 2008) solía referirse a nuestros compañeros de la EEZ como “los hermanos separados”. El jueves 31 de enero de 2019, mientras estaba escribiendo estas notas, falleció Manolo Romero. Desde aquí mi recuerdo más cariñoso para un excelente compañero y entrañable amigo, que formó parte importante de mi educación sentimental.



Defensa de la tesis en junio de 1981. En la fila de la derecha, de delante a atrás: Manolo Sáez, Álvaro Giménez, Emilio J. Alfaro y Eduardo Battaner. En la fila de la izquierda, de delante a atrás: Jesús Biel, Paco Sánchez, Juan Orús y Ramón Canal.

estar ya asentado -teníamos secretaria de dirección, Pilar Sánchez Saavedra, lo que nos daba un toque de distinción-, y nuevos compañeros se habían unido al grupo. Pepe García-Pelayo había dejado la UCM y se había incorporado al IAA arrastrando a Álvaro Giménez Cañete, que también comenzaba la tesis doctoral bajo su dirección. Los tres compartíamos despacho y lecturas extra-académicas, que cada mañana eran comentadas y discutidas antes de la cotidiana reunión para planificar el trabajo del día. Desde la distancia temporal que me separa de aquel despacho, es difícil asegurar que fue una época dorada sin que me asalte la duda de si la juventud perdida distorsiona la imagen, o si la vida era entonces tan maravillosa como la recuerdo.

Si alguien se ha hecho la idea de que Pepe era un director de tesis tiránico, bajo cuya férula estuve a punto de morir asado a la parrilla como mártir de la astronomía, debo declarar que nada más lejos de la realidad. Pepe es noble, inteligente y sabio, y supo trabajar codo con codo a nuestro lado enseñándonos el valor del esfuerzo cotidiano, la necesidad de contrastar las hipótesis hasta no dejar ningún margen a la mala suerte y que el tratamiento superficial de los problemas es la vía más rápida hacia el desastre. Pepe era un lujo a nuestro alcance.

“LA CAÓTICA”

En la EEZ convivimos con botánicos, zoólogos, bioquímicos, microbiólogos, veterinarios, edafólogos y otros colegas aparentemente alejados de nuestra temática, pero unidos por las esperanzas y frustraciones suscitadas por la práctica común de la actividad científica. Con José Emilio Guerrero, Edu Molina, Pepe Casadesús, Mati Barón y muchos otros compartíamos ciencia, café y

protestas. Quizás la más sonada fue un encierro que duró más o menos una semana, y que se acompañó de la redacción de un documento que alcanzó a tener nombre propio: “La Caótica”. Mucho ha cambiado la estructura de la ciencia en España desde la proclamación de La Caótica, y es innegable que estos años han supuesto un gran avance en el desarrollo científico del país, que lo ha situado en el grupo de cabeza de la investigación internacional en varias áreas temáticas, pero hay problemas de vertebración, principalmente relacionados con la estructura e implante de una carrera científica y técnica, que no se han resuelto todavía y que ya estaban denunciados en nuestro primigenio documento.

Las noches de encierro se amenizaban con discusiones político-científicas, algún que otro espectáculo lúdico-musical y, en ocasiones, el lanzamiento de globos de helio. La llegada de Sebastián Vidal Pezzi al IAA nos proporcionó una fortaleza tecnológica que se puso de manifiesto en esas caóticas noches. Sebas elaboraba pequeños artefactos luminosos con luces de colores parpadeantes, que lanzábamos al cielo granadino en los globos de gas. La brisa serrana desplazaba estos aerostatos a grandes distancias de la EEZ y con trayectorias aleatorias, de tal forma que el número de avistamientos OVNI se incrementó considerablemente ese verano, y las páginas del periódico Ideal se hicieron eco de la alarma de algunos vecinos al encontrar artefactos electrónicos unidos a globos desinflados en sus jardines y campos de labranza. Al final, La Caótica, como el valentón cervantino, “... caló el chapeo, requirió la espada, miró al soslayo, fuese y no hubo nada”.

En junio de 1981, el año del golpe de Tejero, defendí la tesis doctoral junto a

Manolo Sáez Cano y Álvaro Giménez Cañete. El tribunal estuvo presidido por Juan Orús, de la Universidad de Barcelona (UB), con Eduardo Battaner (UGR) como secretario y Jesús Biel (UGR), Ramón Canal (UB) y Francisco Sánchez, del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), como vocales. La etapa final de la tesis no estuvo exenta de sobresaltos. Siempre tuve la sensación de que la humanidad me veía tan desvalido que suscitaba una especie de compasión ecuménica, de tal forma que cualquier ser humano adoptaba indefectiblemente una actitud colaboradora y cooperante ante mis tribulaciones. La escritura de la tesis corroboró esta hipótesis. La llegada del ordenador VAX nos había convertido en la avanzadilla informática de muchos centros de investigación no solo en Granada sino en España. Entre otras cosas, el VAX llevaba incorporado un editor de texto que, a pesar de su simplicidad, representaba una clara ventaja frente a la máquina de escribir IBM, que era la otra alternativa disponible para la presentación en papel de cualquier documento. Escribí mi tesis con el nuevo ordenador y, aparentemente, la almacené en el VAX. Cinco días antes de la fecha prevista para la entrega de la memoria de la tesis, el documento había desaparecido de la memoria del VAX. Los dioses conjuraron esta maldición del averno enviándome a Angelines González País. Angelines tardó menos de cinco días en mecanografiar de nuevo la tesis con la IBM, pero yo le estaré agradecido toda la vida.

La etapa postdoctoral se presentaba tranquila y apacible; pertenecía a un grupo de investigación al cual me sentía muy unido, había buenos proyectos en perspectiva y el CSIC, con una política científica que hoy en día nos parecería aberrante, concedía una beca postdoctoral en el mismo centro de realización de la tesis, si esta se había finalizado dentro del período oficial de disfrute de la beca de doctorado. Sin embargo, el pasado volvió para desbaratar cualquier plan. Luis Esquivias, amigo y compañero de carrera, me llamó desde la Universidad de Cádiz. Para haceros el cuento corto, me trasladó una oferta que no pude rechazar y así, a finales de septiembre de 1981, tomaba el tren para ocupar mi nuevo puesto en el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Cádiz. Había pasado algo más de cinco años en el Instituto de Astrofísica de Andalucía. Allí se ensambló el esqueleto de mi vida profesional y, como el poeta, fui joven, feliz e indocumentado.

Pilar López de Coca, nuestra primera astrónoma

POR JOSEFA MASEGOSA E
ISABEL MÁRQUEZ (IAA-CSIC)

La reconstrucción de la ciencia en España tras la dictadura solo fue posible gracias al impulso de unos pocos jóvenes investigadores, que comprendieron la importancia fundamental de la investigación y el conocimiento para hacer viable una sociedad democrática con futuro. En los primeros tiempos de democracia no había en España referentes en los que apoyarse, ni para la ciencia en general ni en astrofísica en particular. La situación en los países de nuestro entorno era tan avanzada y diferente que tampoco podía servir de modelo. Había pues que impulsar desde cero la astrofísica e inventarse un modo de estructuración y desarrollo. Esa tarea fue emprendida por un puñado de jóvenes científicos, entre los que jugó un papel indiscutible Pilar López de Coca.

Pilar nació en Málaga en 1948. En 1970 se licenció en Ciencias Químicas por la Universidad de Granada (UGR) y ahí comenzó su labor investigadora. Entre 1970 y 1975 compartía las clases en la facultad con todo el trabajo, no medible, de la creación en 1975 de la licenciatura en Ciencias Físicas en la UGR así como la creación ese mismo año del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA). El encuentro fortuito con su compañero de vida, Ángel Rolland, y los compañeros de facultad, Jose María Quintana y Eduardo Battaner, proporcionó el ambiente necesario para comenzar las primeras investigaciones en astrofísica. Se embarcaron conjuntamente con el profesor Teodoro Vives en el proyecto de lo que sería el germen de la astronomía en Sierra Nevada: el Observatorio del Mojón del Trigo (OMT), equipado con un pequeño telescopio de treinta centímetros donado por la Universidad de Georgetown.

En 1971 la Compañía de Jesús vendió los terrenos del Campus de Cartuja a la UGR, adquiriendo esta los derechos de explotación del OMT, si bien la propiedad seguía en manos de la Compañía de Jesús. El decano de la Facultad de Ciencias asumió el puesto de director del Observatorio de Cartuja y Jose María Quintana, el de secretario. En



Izda, Pilar López de Coca. Dcha, telescopio de 30 cm del Mohón de Trigo.

1975 se firmaba un convenio entre la UGR y el CSIC para el uso de este observatorio y la creación del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), bajo la dirección de Jose María Quintana. En esa época temprana surgió el sueño de dotar al recién creado IAA con un observatorio con medios propios. Con un presupuesto ínfimo, se firmaron sendos acuerdos con el Observatorio de Niza y el Observatorio Real de Greenwich para la instalación de un telescopio de sesenta centímetros y otro de setenta y cinco respectivamente. Estos telescopios vieron primera luz en 1982 y 1983, constituyendo lo que hoy conocemos como Observatorio de Sierra Nevada (OSN). En solo trece años este grupo pionero de astrofísicos había fundado el IAA y lo había dotado con medios de observación aceptables.

ESTRELLAS DELTA SCUTI

Este despliegue de medios, que hoy puede parecer modesto pero que en esa época fue todo un logro, dio lugar a las primeras publicaciones científicas del IAA. En 1976 se publica el primer artículo de colaboración entre el IAA y el Observatorio Real de Greenwich titulado *Resultado de la Ocultación de la estrella SAO 79100 con RHEA durante 1974*, con datos obtenidos con el telescopio del OMT. En 1979 aparece publicado el primer artículo con firma del IAA en primer lugar, con Pilar como investigadora principal, *Fotometría en la banda B de Epsilon Cep*. Estos trabajos se realizaron,

en palabras de la propia Pilar durante la entrevista que se le hizo para el programa de la UNED *Mujeres en las estrellas*, con “un observatorio en precario, sin agua corriente [...] observaciones que realicé durante verano de 1973 ya que durante el invierno había que dar clases en la universidad...”. Como es fácil de imaginar, el traslado al OSN con los nuevos telescopios se sintió como un lujo. Es con datos obtenidos en dichos telescopios con los que Pilar realiza su tesis doctoral, defendida en la UGR en 1986. Su tesis es un referente en la investigación de variabilidad de estrellas delta Scuti, ya que estableció la relación periodo-luminosidad-color para este tipo de fuentes, con observaciones de varios cientos de estrellas. Su tesis marcó uno de los logros e hitos en el IAA, ya que durante y a partir de su tesis se han formado varias generaciones de astrofísicos, hoy agrupados en torno al Departamento de Física Estelar del IAA.

Pero sería injusto limitarse a la labor de Pilar como científica. Detrás de su calidad científica hay un ser humano de primer nivel. Ha sido un modelo de persona, por su generosidad y disponibilidad para todos los astrónomos y astrónomas que nos incorporamos al IAA o solo pasaron un rato por aquí. Por esto queremos resaltar el papel que ha jugado Pilar, brindándonos su amistad en momentos de regocijo, y también en los difíciles, a quienes hemos tenido la oportunidad de compartir con ella nuestros sueños. Gracias, Pilar, por tu incansable apoyo.

IMPACTOS EN LA LUNA

POR JOSÉ MARÍA MADIEDO (UNIVERSIDAD DE HUELVA)

1 LA LUNA, UN DETECTOR GIGANTE

En diciembre de 1972, el astronauta de la misión Apolo 17 Harrison Schmitt afirmó haber visto un destello de luz sobre la superficie de la Luna mientras orbitaba nuestro satélite natural. Se cree que ese destello pudo deberse al impacto de una roca del enjambre de meteoroides de las Gemínidas, pues esta lluvia de meteoros originada por el asteroide Faetón se encontraba activa en la Tierra en aquel momento. Y es que los enjambres de partículas desprendidas de asteroides y cometas afectan simultáneamente a la Tierra y a la Luna, pues la sección transversal de estos “tubos meteóricos” es superior a la distancia que separa ambos orbes. En el caso de la Tierra, los meteoroides impactan contra la atmósfera a velocidades comprendidas entre doce y setenta y dos kilómetros por segundo. En estas condiciones, el choque contra las moléculas del aire eleva bruscamente la temperatura de la superficie del meteoróide hasta varios miles de grados centígrados, de forma que tanto las moléculas que forman parte de la partícula como las del aire que chocan contra ella emiten energía, observándose entonces el fenómeno luminoso denominado meteoro. En ese proceso, el meteoróide pierde masa al adentrarse en la atmósfera, pues se funde y evapora parte del material, de forma que este se desprende y forma una columna de gas ionizado alrededor de la partícula. En la mayoría de los casos el meteoróide se destruye completamente en la atmósfera, sin alcanzar el suelo. Solo cuando el meteoróide es lo suficientemente grande y resistente, una parte del material sobrevive e impacta en el suelo en forma de meteorito.

Pero la Luna carece de atmósfera que la proteja de los impactos, por lo que hasta las partículas de menor tamaño chocan contra la superficie lunar y producen un cráter. Lo que sucede en este caso es que parte de la energía cinética del meteoróide se convierte en luz cuando la partícula colisiona a gran velocidad contra el suelo. Así, los destellos producidos por el impacto de meteoroides nos permiten estudiar el entorno meteórico del sistema Tierra-Luna utilizando la Luna como un gran detector que nos proporciona información sobre la frecuencia de estas colisiones. El análisis de estos destellos permite estimar el flujo de materia interplanetaria que impacta contra la Luna, y este valor puede escalarse para obtener el flujo de impactos contra la Tierra. También es importante destacar que los impactos contra la Luna se producen en régimen de hipervelocidad, a varias decenas

de kilómetros por segundo. Y, por tanto, el análisis de los destellos de impacto registrados en la Luna nos permite estudiar la física de estas colisiones, dado que estas velocidades no pueden conseguirse en la actualidad en ningún laboratorio.



Los destellos de impacto suelen ser tenues y muy breves: generalmente su duración es de varias centésimas de segundo y su brillo máximo está comprendido entre las magnitudes siete y once. Estos eventos pueden detectarse mediante telescopios ubicados en tierra empleando cámaras de alta sensibilidad. Los telescopios deben apuntar a la zona nocturna del disco lunar, para que así los destellos puedan resaltar sobre un suelo lunar oscuro. Se necesita utilizar, al menos, dos telescopios monitorizando simultáneamente la misma zona, para distinguir los destellos producidos por impactos de meteoroides de otros fenómenos que generan falsos positivos, como los reflejos de la luz solar en basura espacial y satélites situados entre la Tierra y la Luna, o el efecto de los rayos cósmicos sobre el sensor de las cámaras. Las primeras observaciones sistemáticas de estos eventos con este tipo de equipamiento fueron llevadas a cabo desde el Instituto de Astrofísica de Andalucía en 1997. Así, en 1999 investigadores del IAA detectaron por primera vez destellos de impacto coincidiendo con la gran lluvia de meteoros de las Leónidas de ese año. Y posteriormente se identificaron destellos de impacto durante el periodo de máxima actividad de varios enjambres de meteoroides, como por ejemplo las Perseidas, así como destellos de origen esporádico, mucho más raros. La técnica desarrollada por el IAA fue adoptada en el año 2005 por un grupo de investigadores de la NASA, y en el año 2017 comenzó a ser utilizada por el proyecto NELIOTA de la ESA.

2 EL PROYECTO MIDAS

El equipo del investigador José Luis Ortiz, del IAA, en colaboración con José María Madiedo, de la Universidad de Huelva, están llevando a cabo desde el año 2009 un proyecto conjunto para la detección de destellos de impacto en la Luna. Este proyecto fue bautizado con el nombre de MIDAS (*Moon Impacts Detection and Analysis System*) y comenzó a desarrollarse desde nuestro observatorio situado en Sevilla, utilizando varios telescopios cuyo diámetro oscila entre once y catorce pulgadas. En 2012 este sistema se amplió, poniéndose en funcionamiento un telescopio adicional de cuarenta centímetros de diámetro en el

Complejo Astronómico de La Hita (Toledo). Y en el año 2015 entraron en funcionamiento dos telescopios de catorce pulgadas ubicados en el observatorio de La Sagra.

A lo largo de estos años han sido varios los hitos que se han logrado en el marco de este proyecto. Entre ellos destacan el desarrollo de una técnica para determinar el origen de los meteoroides que impactan contra la Luna, la primera medición de la temperatura de estos impactos y el registro del mayor destello de impacto grabado y confirmado hasta la fecha.

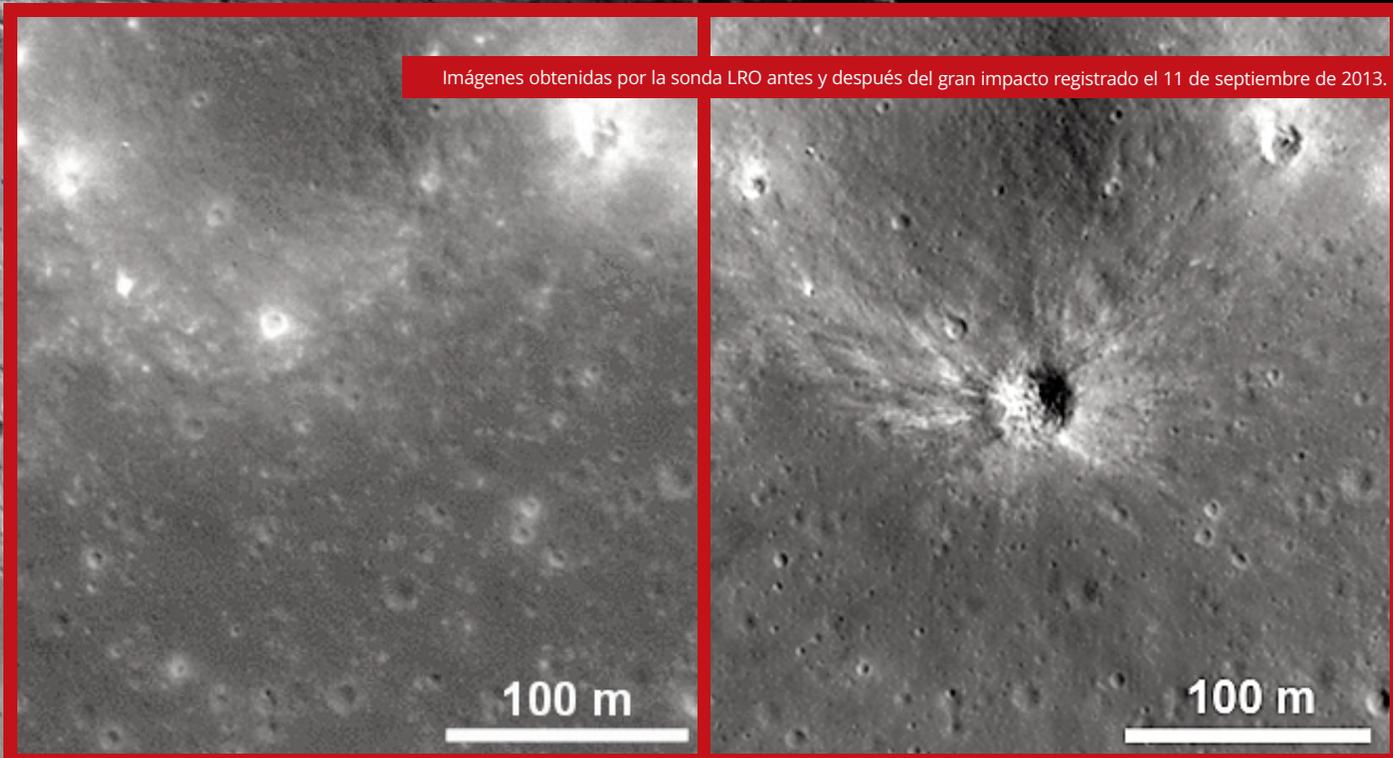
DECONSTRUCCIÓN

3 EL GRAN IMPACTO DEL 11 DE SEPTIEMBRE DE 2013

El 11 de septiembre de 2013 dos telescopios del proyecto MIDAS detectaron un destello inusualmente largo y brillante en el Mar de las Nubes. Con una duración superior a ocho segundos y un brillo similar al de la estrella Polar, este evento se convertiría en el destello producido por el mayor impacto sobre la Luna del que se hayan tomado imágenes hasta la fecha. De hecho, en teoría habría podido verse incluso a simple vista desde la Tierra, sin necesidad de instrumentos ópticos. Los cálculos indican que la energía del impacto fue equivalente a la explosión de quince toneladas de TNT y que el meteoróide tenía una masa de unos cuatrocientos cincuenta kilos. También se estimó que el cráter producido por

esta colisión tendría un diámetro de unos cuarenta metros. La localización de este cráter se convirtió en objetivo de la misión LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*), que obtuvo imágenes del mismo mediante un sistema de tres cámaras denominado LROC (*Lunar Reconnaissance Orbiter Camera*). Las fotografías mostraron que los escombros producidos durante la excavación del cráter fueron lanzados a más de quinientos metros del punto de impacto. Además, se daba la circunstancia de que el cráter se encontraba a tan sólo dos kilómetros de la posición prevista por MIDAS, algo que sorprendió a los responsables de esta misión espacial.

Imágenes obtenidas por la sonda LRO antes y después del gran impacto registrado el 11 de septiembre de 2013.



4 TEMPERATURA

Gracias a observaciones realizadas simultáneamente en el visible y en el infrarrojo, MIDAS se convirtió en el primer proyecto en medir la temperatura que alcanza la columna de escombros generada al impactar los meteoroides contra la Luna. El primer destello para el que se consiguió realizar esta medición se registró el 25 de marzo de 2015 en las proximidades del cráter Copérmico. Alcanzó la magnitud siete en el visible, midiéndose una temperatura máxima de unos cuatro mil grados kelvin. Hasta entonces, estas temperaturas solamente se

habían podido estimar mediante simulaciones.

El 21 de enero de 2019, MIDAS midió la temperatura del primer destello de impacto registrado durante un eclipse lunar. Con una luminosidad máxima equivalente a magnitud visual cuatro, la temperatura máxima medida en este caso fue de unos cinco mil setecientos grados kelvin. Esta vez, además, se realizaron observaciones en tres longitudes de onda diferentes, y pudo establecerse así que la emisión de luz de estos destellos se corresponde con la de un cuerpo negro.

EL MOBY DICK DE...

...ROMANO CORRADI (IAC/GTC)

NEBULOSA DEL CANGREJO DEL SUR

Como el título de esta sección es *El Moby Dick de...*, me voy a centrar en otro animalito acuático que ha sido relevante en el desarrollo de mi carrera como investigador astrofísico. Hay que volver atrás uno cuantos años (!28!), cuando fui al Observatorio Europeo Austral (ESO) en Chile y, con mucha timidez, me presenté a mi supervisor, Hugo Schwarz, que con los años se convirtió en uno de mis mejores amigos antes de, desgraciadamente, fallecer en un accidente de moto en La Serena. Entonces no existía el Observatorio de Cerro Paranal ni oficinas en Santiago de Chile para los investigadores de ESO, por lo que pasábamos la mayor parte del tiempo en el Observatorio de La Silla en una especie de grandísima familia de un centenar de personas que compartían tiempo de trabajo y de ocio. De Hugo aprendí muchas cosas, una de ellas dar la debida importancia al trabajo, disfrutando de la suerte de tener uno tan creativo y variado como el de astrofísico pero sin sacrificar los otros importantes aspectos de la vida. Enseñanza que desde que trabajo para el Gran Telescopio Canarias (mi Moby Dick actual) olvido con demasiada frecuencia.

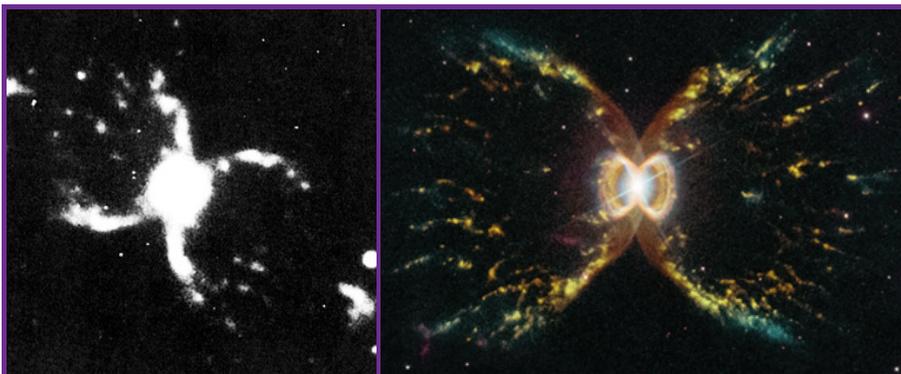
Hugo me transmitió también la pasión por las nebulosas de gas ionizado que se originan como consecuencia de la pérdida de masa de las estrellas, un ingrediente crucial para entender su evolución final. Una de las nebulosas más llamativas que Hugo acababa de descubrir es el Cangrejo del Sur que, a diferencia de su homónimo del hemisferio norte, sí se parecía a un verdadero cangrejo en las imágenes de su descubrimiento.

ESTRELLAS SIMBIÓTICAS

Esta nebulosa no se produce por la expulsión de la envoltura de una estrella y su sucesiva ionización por parte del remanente estelar en su fase transitoria de altísima temperatura y luminosidad. Es decir, no es una nebulosa planetaria genuina, sino el resultado de la interacción entre dos estrellas cercanas, una enana blanca caliente que ioniza el gas que una gigante roja pierde copiosamente. Estos sistemas se denominan estrellas simbióticas, y sus nebulosas extensas nos ayudan a entender los complejos mecanismos de interacción en estrellas binarias



Doctorado en astrofísica de la Universidad de Padua. Después de trabajar en el Observatorio La Silla (ESO) de 1991 a 1993, comenzó su trabajo en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), y más tarde en el grupo de telescopios Isaac Newton. Es investigador del IAC y, desde 2016, director del Gran Telescopio Canarias (GTC). Sus principales intereses científicos son las últimas etapas de la evolución estelar y la química del medio interestelar en el universo cercano.



con periodos orbitales de entre un año y un milenio, y las erupciones de tipo nova que sufren periódicamente.

Con los años, he seguido buscando y diseccionando, espectroscópicamente hablando, muchísimas otras nebulosas planetarias o alrededor de estrellas simbióticas, en todo el Grupo Local. Curiosamente, varias de ellas tienen apodos de animales, como las nebulosas Mariposa, Hormiga, Ojo de Gato, o Calamar Gigante (esta probablemente esté producida por estrellas mucho más masivas). Son nombres que reflejan la extraordinaria variedad de formas que presentan, cuya explicación ha sido uno de los temas más controvertidos en las últimas tres décadas de este campo de investigación, y que tiene todavía muchos aspectos por resolver, aunque nos hayamos puesto más o menos de acuerdo en que la evolución en sistemas binarios es la solución al problema.

En los años sucesivos conseguimos observar el Cangrejo del Sur con el Telescopio Espacial Hubble (HST), para intentar reconstruir la historia del sistema y la formación de un segundo cangrejo en miniatura en su centro, y recientemente el mismo HST ha tomado una nueva imagen del objeto para celebrar su vigesimonoveno cumpleaños. El objeto es tan llamativo que en mi despacho tengo un libro sobre SETI que propone usar objetos astronómicos con morfología singular como el Cangrejo del Sur como “argumento de conversación” cuando entremos en contacto con otra civilización de nuestra galaxia, en el supuesto de

necesitar referencias comunes que sean fácilmente reconocibles para cualquier interlocutor galáctico que entienda de astronomía.

Las nebulosas planetarias y los objetos relacionados como las estrellas simbióticas nos ayudan a entender las fases finales de la vida de estrellas de tipo solar, y el retorno al medio interestelar del gas enriquecido con los elementos químicos que se producen en el interior de las estrellas. Pero su estudio tiene también implicaciones importantes en otros campos astrofísicos, como la formación de moléculas orgánicas complejas en la mezcla de gas y polvo que va enfriándose mientras se aleja de estas estrellas; la producción de las supernovas de tipo Ia, importantes para la cosmología; la producción de jets (chorros) astrofísicos, cuyos mecanismos de formación parecen ser universales independientemente de la escala –estelar o galáctica– que se considere; la evolución de las estrellas variables cataclísmicas y la fase de envoltura común, un proceso tan importante como desconocido. Sin contar su importancia como indicadores de la química, luminosidad, cinemática, y distancia de galaxias externas gracias a su alta luminosidad en longitudes de onda específicas y sus características espectrales, que permiten su identificación hasta distancias de cien megapársecs con la instrumentación disponible hoy en día. Todos estos temas me parecen fascinantes, así como muchísimos otros de la astrofísica moderna. Qué suerte estar en este mundillo.

CARMENES estudia atmósferas que se evaporan y vapor de agua más allá del Sistema Solar

EL CANAL INFRARROJO DEL INSTRUMENTO CARMENES, DESARROLLADO EN EL IAA, ABRE UNA PUERTA AL ESTUDIO DESDE TIERRA DE LA COMPOSICIÓN DE LAS ATMÓSFERAS EXOPLANETARIAS, SUS PROCESOS DE ESCAPE Y DE SUS NUBES Y AEROSOL

Con más de tres mil ochocientos planetas extrasolares detectados hasta la fecha, el siguiente paso consiste en describir sus características y conocer estos mundos en detalle. Y CARMENES, un espectrógrafo de alta resolución codesarrollado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía e instalado en el Observatorio de Calar Alto (CAHA), se está posicionando como un instrumento líder: ha analizado la proporción de helio y de vapor de agua en las atmósferas de varios exoplanetas, ofreciendo datos con mejor resolución que los del Telescopio Espacial Hubble y abriendo nuevas vías en estudios atmosféricos.

“CARMENES es realmente dos instrumentos en uno, al observar de forma simultánea en el visible y en el infrarrojo. Esto nos permite, por un lado, realizar detecciones de planetas directas evitando falsos positivos y, por otro, acometer el estudio de las atmósferas planetarias. Esto último es posible gracias al canal infrarrojo (CARMENES-NIR), que constituye una referencia en su campo a nivel mundial”, apunta Pedro J. Amado, investigador del IAA-CSIC que ha codirigido el desarrollo de CARMENES.

ATMÓSFERAS EN EVAPORACIÓN

Una gran proporción de los planetas



Arriba, concepción artística del exoplaneta HD 189733b, en el que CARMENES ha detectado vapor de agua. Fuente: Mark A. Garlick / University of Warwick. Dcha., concepción artística de un júpiter caliente con atmósfera en evaporación. NASA/Ames/JPL-Caltech.

extrasolares detectados se catalogan como “jupiteres calientes”, planetas gaseosos muy masivos que giran alrededor de su estrella más cerca que Mercurio del Sol. Sus atmósferas se encuentran sometidas a una intensa radiación estelar que origina una fuerte erosión, y que en algunos casos puede producir la evaporación completa de la atmósfera.

“Los estudios de escape atmosférico en exoplanetas se han realizado mayormente estudiando una línea espectral del hidrógeno, que requiere de observaciones desde el espacio -apunta Lisa Nortmann, investigadora del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)-. Pero existe otro trazador de la evaporación atmosférica, el helio, que hemos observado desde tierra con el instrumento CARMENES en el planeta WASP-69b, y que interpretamos como una señal de que su atmósfera está escapando y dejando un rastro similar a la cola de los cometas”.

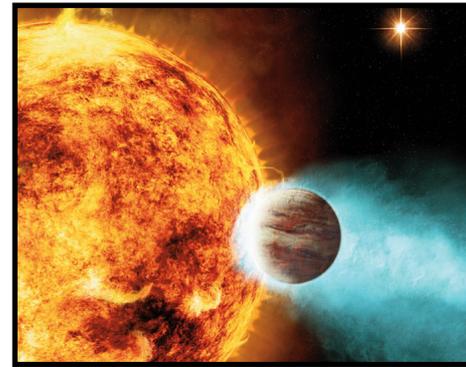
El helio es un átomo muy ligero que se encuentra en las capas más externas de las atmósferas y que, a diferencia del hidrógeno, tiene un estado metaes-

table, lo que se conoce como el triplete del helio, que se había propuesto como sensor de las atmósferas exoplanetarias.

“Sin embargo, el triplete no fue observado hasta este año, con el Telescopio Espacial Hubble -señala Manuel López Puertas, investigador del IAA-. Pero lo hizo a baja resolución espectral, es decir, sin detalles. Nuestras observaciones desde tierra presentan mayor resolución, lo que nos permite saber, tras el modelado de los datos, si se produce escape atmosférico, su extensión, la velocidad a la que se expande o cuánta masa se está perdiendo. Así, hemos demostrado que disponemos de un nuevo método para el estudio de las atmósferas de los planetas extrasolares, y que esperamos tenga una amplia aplicación en el futuro”.

VAPOR DE AGUA: TRAZADOR DE NUBES Y AEROSOL

CARMENES también se ha estrenado en el estudio del vapor de agua en las atmósferas más allá del Sistema Solar, también en un “júpiter caliente” deno-



minado HD 189733b. Se trata de un compuesto que ya había sido detectado desde el espacio en varias ocasiones, pero su detección con CARMENES afianza el camino para el análisis de atmósferas exoplanetarias desde tierra, con el uso de telescopios de cuatro metros como complemento a los espaciales o a los telescopios de ocho o diez metros.

La detección de vapor de agua resulta compleja, y la técnica que se emplea es diferente a la del helio. Mientras que el helio tiene una línea de absorción muy fuerte y no se ve afectada por la atmósfera terrestre, la molécula de agua presenta miles de líneas de absorción muy débiles, que además son parcialmente absorbidas por el vapor de agua de nuestra atmósfera. De ahí la dificultad de obtener dicha señal con telescopios en tierra.

“Las novedades de nuestro estudio respecto a trabajos anteriores radican en que se ha obtenido en varias bandas (o regiones espectrales) diferentes de las usadas hasta ahora; esto nos permite usar esta técnica no solo para detectar el agua sino también para detectar la presencia de nubes y aerosoles. Con este estudio se abre la puerta para el estudio de compuestos moleculares, como metano, agua o dióxido de carbono, en exoatmósferas con CARMENES”, concluye Alejandro Sánchez López, investigador del IAA.

Silbia López de Lacalle

La compleja dinámica de los sistemas de anillos en miniatura

EL HALLAZGO DE ANILLOS EN TORNO A CUERPOS DEL SISTEMA SOLAR QUE NO SON PLANETAS, COMO EL PLANETA ENANO HAUMEA O EL CENTAURO CARICLO, MOSTRÓ QUE SE TRATA DE ESTRUCTURAS MÁS HABITUALES DE LO QUE SE CREÍA. UN TRABAJO ANALIZA LA COMPLEJA DINÁMICA DE ESTOS ANILLOS EN MINIATURA

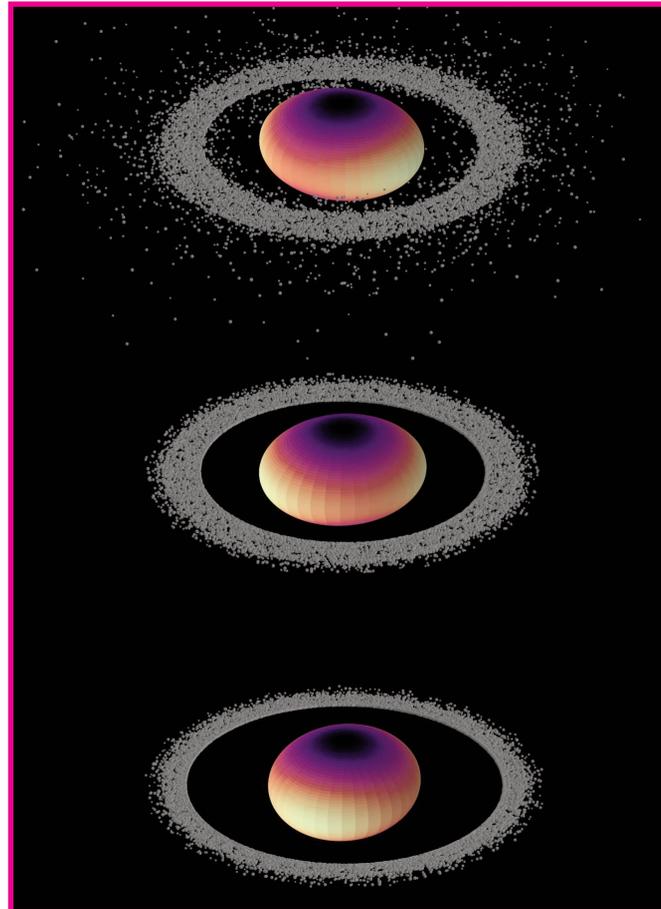
Hasta hace apenas cinco años se creía que los anillos eran rasgos exclusivos de los grandes planetas gaseosos, como Saturno o Urano, pero el hallazgo de anillos alrededor de cuerpos no planetarios del Sistema Solar obligó a revisar estas estructuras, aparentemente más comunes de lo que se pensaba.

Un trabajo, en el que participa el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), ha analizado la dinámica de estos sistemas de anillos en miniatura, más compleja en algunos casos que la de los planetas gigantes debido a la orografía o a la forma alargada de estos cuerpos.

En 2013 y 2017, respectivamente, dos cuerpos del Sistema Solar ingresaban en el reducido grupo de objetos con anillo: Cariclo, el mayor de una población de objetos conocidos como centauros, que se hallan entre Júpiter y Neptuno y que comparten características tanto con los cometas como con los asteroides; y Haumea, un planeta enano situado más allá de Neptuno con forma elipsoidal y un tamaño, en su lado mayor, similar al de Plutón.

COMPLEJIDAD DINÁMICA

Ambos presentan anillos estrechos y



Resultado de una integración numérica que muestra la evolución de unas setecientas partículas que orbitan alrededor de un cuerpo alargado de tamaño y forma similar a Cariclo (un elipsoide con los ejes principales de 314 x 278 x 172 kilómetros). Las partículas están sujetas a una fuerza disipativa radial que simula el efecto de las colisiones.

Después de tres meses (panel superior), la mayoría de las partículas dentro de la corotación (a 190 kilómetros del centro de Cariclo) cayeron sobre el cuerpo. Después de un año (panel central), se ha vaciado el área interna, y después de un año (panel inferior) las partículas continúan su migración hacia las áreas externas.

confinados, lo que sugiere la existencia de "satélites pastores" que contribuyan a que los anillos permanezcan confinados, como los que se observan alrededor de Saturno y Urano. Sin embargo, existe una diferencia importante entre los planetas gigantes y los cuerpos no planetarios, ya que estos últimos pueden mostrar formas muy irregulares: pueden presentar relieves, como cráteres o montañas, inexistentes en los planetas gaseosos, o mostrar una forma alargada (Haumea, por ejemplo, presenta una forma achatada como un balón de rugby).

"En este trabajo demostramos que estas deformaciones o irregularidades crean resonancias gravitatorias entre el cuerpo y las partículas del anillo que provocan que la órbita sincrona (o de corrotación), en la que las partículas tienen un periodo orbital

igual al de rotación del cuerpo central, se vacíe: las partículas del disco que se encuentran dentro de la corrotación caen hacia el objeto central y, por el contrario, las que se hallan fuera son empujadas hacia el exterior, más allá de la resonancia 1:2 (en la que completan una revolución alrededor del cuerpo en el tiempo que este gira dos veces sobre sí mismo)", señala Pablo Santos-Sanz, investigador del IAA que participa en el trabajo.

Las escalas de tiempo asociadas a la migración de las partículas del disco son pequeñas, de unos pocos años en el caso de cuerpos alargados, como Haumea. Para un cuerpo esférico con una montaña ecuatorial de cinco kilómetros, la zona de corrotación puede vaciarse en menos de un millón de años, un periodo de tiempo muy breve en comparación con la edad del Sistema Solar.

Estas conclusiones quedan confirmadas en los objetos conocidos: los anillos de Cariclo y Haumea se hallan a cuatrocientos y dos mil doscientos noventa kilómetros, fuera de sus resonancias 1:2, que se producen a trescientos y mil setecientos cincuenta kilómetros respectivamente.

Otra predicción del trabajo presentado afecta a la rotación del propio cuerpo, que debe girar muy rápidamente sobre sí mismo para que las partículas a esa distancia se mantengan formando un anillo estable o, de lo contrario, se expulsarían más allá, para terminar quizá formando satélites. Para cuerpos helados como Cariclo y Haumea el periodo de rotación debe ser inferior a siete horas, algo que también se cumple, ya que giran sobre sí mismos cada siete y cuatro horas, respectivamente.

"Se trata de un campo de estudio aún nuevo, ya que hasta hace cinco años no sabíamos que estos objetos podían presentar anillos. Estos mecanismos podrían también explicar la formación de satélites alrededor de ciertos cuerpos, a través de la migración de un disco inicialmente más próximo al objeto", concluye Pablo Santos-Sanz (IAA-CSIC).

Silbia López de Lacalle

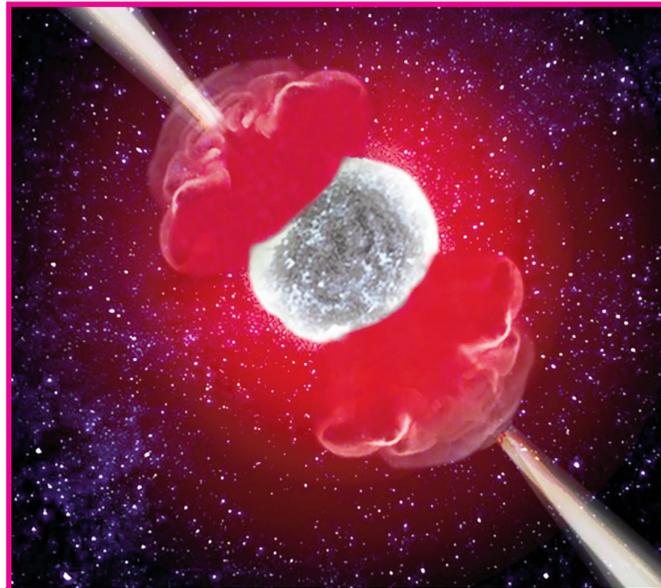
La observación de una rara hipernova completa el relato de la muerte de las estrellas más masivas

EL ANÁLISIS CONFIRMA LA EXISTENCIA DE UN CHORRO DE MATERIAL QUE EMANA DEL NÚCLEO DE LA ESTRELLA, PERO AÑADE UN NUEVO COMPONENTE AL ESCENARIO

El fin de la vida de las estrellas depara escenarios plácidos en el caso de las estrellas de baja masa, como el Sol. No así en el de las estrellas muy masivas, que sufren eventos explosivos tan intensos que pueden superar en brillo a toda la galaxia que las alberga. Un grupo internacional de astrónomos ha estudiado en detalle el fin de una estrella de gran masa que ha producido un estallido de rayos gamma (GRB) y una hipernova, lo que ha permitido detectar un nuevo componente en este tipo de fenómenos. El estudio aporta el eslabón para completar el relato que vincula las hipernovas con los GRBs.

“En 1998 se detectaba la primera hipernova, una versión de las supernovas muy energética, que siguió a un estallido de rayos gamma y que supuso la primera evidencia de la conexión entre ambos fenómenos”, apunta Luca Izzo, investigador del IAA que encabeza el estudio.

El escenario propuesto para explicar el fenómeno involucra una estrella de más de veinticinco masas solares que, al agotar su combustible, sufre un proceso de colapso del núcleo. Al derrumbarse sobre sí mismo, el núcleo genera un agujero negro o una estrella de neutrones y, al tiempo, surgen dos chorros polares de materia que atraviesan las capas externas de la estrella y que, al emerger al medio, producen estallidos de rayos gamma (los GRBs). Finalmente se produce la explosión de hipernova, que puede ser decenas de veces más intensa que una supernova.



Representación artística de la hipernova. La interacción del chorro con las capas externas de la estrella forma una envoltura que rodea la cabeza del chorro y comienza a propagarse lateralmente con respecto a la dirección del chorro. El chorro es capaz de perforar completamente la envoltura de la estrella madre, emitiendo la emisión de tipo gamma de alta energía, responsable de GRB. Fuente: Anna Serena Esposito.

Pero, aunque tras veinte años de estudio la relación entre los GRBs y las hipernovas parece inequívoca, no se cumple en sentido contrario, ya que se han detectado varias hipernovas que no llevan asociados estallidos de rayos gamma. “Este trabajo ha permitido hallar el eslabón perdido entre estos dos subtipos de hipernova en la forma de un nuevo componente: una especie de envoltura caliente que se forma en torno al chorro según se propaga a través de la estrella progenitora —apunta Izzo (IAA-CSIC)—. El chorro transfiere una parte importante de su energía a la envoltura y, si logra atravesar la superficie de la estrella, producirá la emisión de rayos gamma que identificamos como GRB”.

Sin embargo, el chorro puede malograrse dentro de la estrella y no emerger al medio al carecer de energía suficiente, circunstancia en la que se produce una hipernova pero no un GRB. Así, la envoltura detectada en esta investigación supone el enlace entre

los dos subtipos de hipernova estudiados hasta ahora, y estos “chorros sofocados” (del inglés *choked-jets*) explicarían de forma natural las diferencias.

LA HISTORIA DEL EVENTO

El 5 de diciembre se detectaba el estallido GRB171205A en una galaxia situada a apenas quinientos millones de años luz de la Tierra, lo que lo convierte en el cuarto GRB más próximo conocido. “Fenómenos de este tipo ocurren de media una vez cada diez años, así que enseguida comenzamos una intensa campaña de observación con el Gran Telescopio Canarias para observar la hipernova emergente desde las primeras fases —apunta Christina Thöne, investigadora del IAA-CSIC que participa en el hallazgo—. De hecho, se trata de la detección más temprana de una hipernova hasta la fecha, menos de un día después del colapso de la estrella”.

Y, en efecto, enseguida se observaron las primeras evidencias de la presencia

de una hipernova. “Esto fue posible gracias a que la luminosidad de los chorros era mucho más débil de lo normal, ya que por lo general los eclipsan la emisión de la supernova durante la primera semana —señala Antonio de Ugarte Postigo, investigador del IAA-CSIC que participa en el hallazgo—. Se trataba, sin embargo, de una hipernova peculiar, ya que mostraba velocidades de expansión muy altas y unas abundancias químicas diferentes a las registradas en eventos similares”.

Esta peculiar composición química y las velocidades asociadas encajan con la existencia de un chorro rodeado de una envoltura que se abre camino en la superficie de la estrella, algo que se había predicho pero que aún no se había observado. La envoltura que acompaña al chorro durante los primeros días arrastra material desde el interior de la estrella, y en el caso estudiado permitió determinar su estructura química. Pasados unos días, esta componente desapareció y la hipernova evolucionó de forma similar a las observadas anteriormente.

La energía total emitida por la envoltura fue superior a la del GRB, lo que implica que el chorro depositó gran parte de su energía en ella. Pero también muestra que la energía del GRB depende de la interacción del chorro con el material estelar y de esta nueva componente, la envoltura. Y, además, pone de manifiesto la necesidad de revisar los modelos: “Mientras que el modelo estándar de supernovas de colapso de núcleo conduce a explosiones casi esféricas, la evidencia de una emisión tan energética producida por una envoltura de este tipo sugiere que el chorro juega un papel importante en las supernovas con colapso central, y es necesario que tengamos en cuenta la función del chorro en los modelos de explosión de supernovas”, concluye Izzo (IAA-CSIC).

Silbia López de Lacalle

Sondas encantadoras, rovers adorables

Corría el año 2007 cuando, una noche oscura, caminaba yo de vuelta a casa por un callejón solitario. De repente oí un ruido a mi espalda y, cuando me volví, vi una rata que cruzaba la calle como Pedro Duque por su nave (ingenioso paralelismo con la más convencional expresión “como Pedro por su casa”, que sirve para avisar sutilmente al lector de que esto va a ir hoy de misiones espaciales). Cuando la rata se dio cuenta de mi presencia se paró y se quedó mirándome durante unos segundos. Luego continuó tranquilamente su camino y se perdió por uno de esos agujeros que solo son capaces de ver los roedores y los inspectores de Hacienda. ¿Que por qué cuento una historia tan insulsa? ¿Que por qué me acuerdo de la fecha? En realidad no me acordaba, pero la he podido comprobar fácilmente porque recuerdo que fue pocas semanas después del estreno de Ratatouille, y eso hizo que mi encuentro con aquel roedor perdiera sus connotaciones siniestras y se convirtiera en algo más cordial. Y es que cuando la rata me miró no solo me sorprendí a mí mismo pensando “a ver qué dice”, sino que hasta esperaba que me hiciera un suffé. Nos guste o no, Disney (y ahora Pixar) han cambiado para siempre nuestra relación con los animales. Algo parecido sucede con las misiones espaciales de los últimos años, en las que la divulgación de resultados para el gran público se basa en campañas preciosas con dibujitos y guiones maravillosos. Así sucedió con la misión Rosetta, que publicó unos vídeos encantadores en los que la sonda era una madre cariñosa que pacientemente informaba al pequeño módulo de aterrizaje Philae, que era tan mono que daban ganas de achucharlo, del estado de la misión y del tiempo que quedaba para llegar al destino. Al rover Opportunity se le suele representar como un trabajador incansable, que intenta por todos los medios alcanzar los objetivos para no defraudar a sus jefes y volver

cuanto antes a una Tierra que echa de menos. Y, aunque no está basado en una misión real, no puedo evitar volver a Pixar para citar aquí una de mis películas de animación favoritas, tal vez un tanto olvidada si la comparamos con sus más grandes éxitos, WALL-E, que se desarrollaba en un escenario



que cada día nos resulta más cercano y familiar: un planeta Tierra desbordado por la acumulación de residuos, que ha sido abandonado por la raza humana a la espera de que los robots limpiadores detecten un atisbo de vida que haga posible la vuelta de la humanidad a casa. Igual que Rosetta/Philae y Opportunity, WALL-E es un personaje genial, cargado de expresividad y sentimientos, hasta el punto de que termina enamorándose (no es spoiler si han pasado más de diez años) de la encantadora sonda que viene en busca del primer brote verde que nace en nuestro planeta tras el apocalipsis de porquería.

TECNOLOGÍA PUNTA

A mí, que tengo alma de niño, me encanta este tipo de divulgación, porque acerca las misiones espaciales de forma divertida y no exenta de rigor a un público que de otra forma no se interesaría por ellas. Pero también reconozco que tiene cierto peligro, porque representar la tecnología a través de memes y películas de animación puede hacer que no valoremos

suficientemente lo que se ha conseguido. Siento ser precisamente yo el que entierre la parte de niño que queda en ti, querido lector, y te lleve a base de collejas al lado adulto de la tecnología: las naves espaciales no tienen ojitos y los rover marcianos no se sienten solos cuando vagan por un planeta desierto ni se alegran cuando consiguen cumplir los objetivos de la misión. Las sondas como Rosetta, los rovers marcianos como Spirit, Curiosity u Opportunity y tantas otras naves e instrumentos que se han enviado a multitud de cuerpos celestes en el sistema solar son ingenios de tecnología punta que han sido diseñados, desarrollados y programados por grupos de ingenieros, que han conseguido coordinar equipos, tareas y tiempos de trabajo para que un sistema complejísimo no solo pueda funcionar en un entorno más hostil que Invernalía en navidad, sino mandar datos para que sepamos qué están encontrando los múltiples instrumentos científicos, cada uno de los cuales es a su vez un complejo sistema en sí mismo que necesita de su propio proyecto de diseño y desarrollo.

LA VIDA ÚTIL DE LAS MISIONES

Tal vez esto que digo le reste algo de romanticismo a las misiones, pero a cambio le añade mucho de épica, de reconocimiento del mérito que tiene llegar a donde hemos llegado, de admiración por los equipos de ingenieros que consiguen que instrumentos creados en la Tierra salgan de nuestro

planeta sin desintegrarse durante el violentísimo despegue de un cohete, consigan encontrar en la inmensidad del espacio cuerpos celestes situados a millones de kilómetros de distancia, obteniendo gran parte de su energía a través de complicadas maniobras de asistencia gravitacional, aterricen en otro episodio todavía más violento que el despegue sin perder ni un tornillo y logren no solo cumplir los exigentes objetivos para los que fueron diseñados, sino muy habitualmente superarlos. Como sucedió con el rover Opportunity, cuya misión se dio por concluida el pasado mes de febrero (noticia que inspiró este artículo, y muchas ilustraciones como la de la izquierda) después de 5.498 días de funcionamiento en Marte, cuando la duración prevista de su misión era de tres meses. 5.498 días, repito. Tres meses, repito. Es decir, estuvo funcionando... ¡sesenta veces más de lo previsto! Es como si el lector, del que se espera que cotice unos cuarenta años, estuviera trabajando hasta los 2.400 años de edad. Sin vacaciones y sin bajas por enfermedad, ojo. Sirvan por tanto estas líneas como homenaje a los equipos humanos que, con ingentes cantidades de trabajo, esfuerzo y cantidades todavía mayores de ilusión y dedicación, consiguen estos logros tecnológicos que hace pocas décadas eran impensables para la mente humana. Opportunity ha dejado de transmitir, sí, pero Curiosity sigue en marcha con nuevos objetivos, nuevos datos y nuevos retos. El rey ha muerto. ¡Viva el rey!



La nave Rosetta y el módulo Philae.

Zonas de habitabilidad galáctica

PILARES

Una Zona de Habitabilidad Galáctica (ZHG) se define como aquella región de una galaxia en la que se dan las condiciones necesarias para que en primer término pueda surgir la vida y, posteriormente, esta logre prosperar durante periodos de tiempo del orden de miles de millones de años. En cierta forma es una generalización del concepto de Zona de Habitabilidad Circunestelar (ZHC), que se define como aquella región en torno a una estrella en la que la temperatura de un planeta permite la existencia de agua líquida en su superficie.

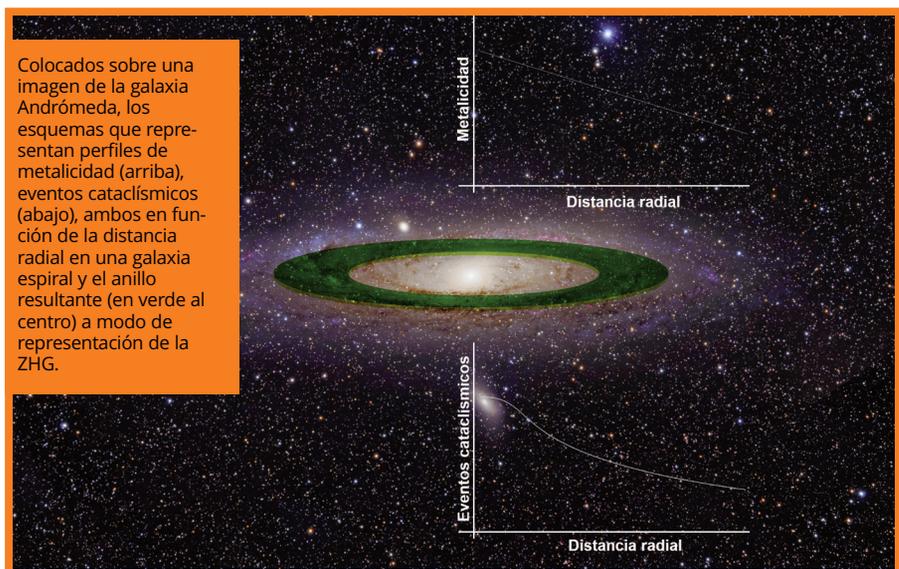
Actualmente se considera que los parámetros definitorios de una ZHG son dos: abundancia de elementos pesados y seguridad ante eventos astrofísicos de tipo cataclísmico.

El primero de ellos se refiere a los elementos químicos necesarios para la formación de la química orgánica, principalmente carbono, oxígeno y nitrógeno. Este parámetro es conocido en astrofísica con el nombre de metalicidad. Dado que son las estrellas medianas y masivas las que producen estos elementos pesados liberándolos al medio interestelar al final de su existencia, son las regiones que han tenido más generaciones de estrellas de estos tipos las que tienen mayor metalicidad y, por ello, donde es más probable el surgimiento de la química necesaria para la aparición de la vida. En nuestra galaxia, y en general en las galaxias espirales, es en sus núcleos donde se ha producido la mayor cantidad de generaciones de

estrellas de estos tipos y en sus bordes la menor. Así, la disponibilidad de elementos químicos para la vida alcanza su máximo cerca de los núcleos galácticos y decae a medida que nos acercamos a los bordes.

El segundo factor es la frecuencia con la que ocurren fenómenos altamente energéticos con la capacidad emitir grandes cantidades de radiación o partículas, pues estas emisiones podrían destruir las moléculas orgánicas y la vida. Los principales procesos astrofísicos de tipo cataclísmico son las explosiones de supernova, los estallidos de rayos gamma, altas tasas de formación estelar seguidas de explosiones de supernova en masa y los chorros que se forman en los discos de acreción de los agujeros negros. Todos estos eventos también son más frecuentes en los núcleos galácticos y menos hacia el borde, lo que hace que las posibili-

dades de mantenimiento de la vida sean mayores hacia el exterior que hacia el centro galáctico. La conjunción de estos dos factores en las galaxias espirales resulta en que sus bordes no son adecuados por la ausencia de elementos pesados aunque resulten astrofísicamente seguros y que sus núcleos tampoco son propicios dados sus altos niveles de radiación aún cuando su composición química sea muy favorable. Así, en las galaxias espirales queda un anillo intermedio entre el núcleo y la periferia como la región donde se armonizan la posibilidad de surgimiento de la vida y la posibilidad de que esta prospere durante miles de millones de años para dejar que la evolución haga su trabajo. Este anillo es su ZHG. En este contexto no es raro que la ubicación del Sol en la Vía Láctea, a unos treinta mil años luz del centro, caiga en este anillo.



INCERTIDUMBRES

Dado que no conocemos más que un ejemplo de vida, no se tiene mucha certeza sobre cuál es el grado mínimo necesario de metalicidad para que pueda surgir la química compleja que lleva a la vida; además, para cada galaxia se requieren estudios más detallados que

tomen en cuenta las diferencias de metalicidad entre los brazos espirales y los espacios entre estos. También se ha especulado sobre un posible efecto que pudiera tener una mayor o menor densidad de materia oscura sobre la dinámica de las ZHG, un tema por completo

abierto a estudio. Otro problema abierto es el de las galaxias que presentan signos de interacción gravitacional que ha deformado su simetría, como por ejemplo las Nubes de Magallanes y otras galaxias aún más fuertemente irregulares.

Dado que esta área de trabajo es relativamente reciente (2001) está aún en construcción y es un campo lleno de incógnitas y de oportunidades.

Mareas atmosféricas

AUTORES: Fran Rodríguez Aguilar, IES El Temple (La Malahá) Francisco Rivas Fernández, IES Fray Luis de Granada (Granada) José Pérez Vidal, IES Padre Suárez (Granada) Hugo Pérez Diéguez, IES El Temple (La Malahá) Adrián Martín Ortega, IES Alhama (Alhama de Granada)

TUTORES: Francisco González Galindo y Maia García Comas.

Las mareas atmosféricas son oscilaciones a escala global que se propagan en el tiempo y en el espacio (longitud, latitud, altura) y que se originan por fluctuaciones periódicas como, por ejemplo, las producidas por la absorción de la radiación solar o la orografía. Aparecen en todas las atmósferas planetarias y producen cambios temporales y espaciales en variables atmosféricas como la temperatura, presión, composición, o vientos. El objetivo de este trabajo ha sido evaluar el impacto de las mareas atmosféricas en la temperatura de la mesosfera de Marte y su variabilidad estacional. Todo ello a partir de los datos públicos de la Mars Climate Database (MCD, modelo atmosférico).

Hemos extraído de la MCD la temperatura entre 50 y 110 km, a hora local y latitud 0, en función de la longitud y la altura para cada estación. A cada altura, hemos restado a la temperatura su media longitudinal, obteniendo así la anomalía. La Figura 1 muestra un ejemplo de esta anomalía (azul), con tres máximos y tres mínimos de temperatura en este caso, impronta típica de una marea con número de onda tres (longitud de onda=360°/3). No obstante, parece coexistir con oscilaciones con otros números de onda. Para poder extraer información más precisa de la amplitud y fase de las oscilaciones superpuestas, hemos utilizado Microsoft Excel y su complemento Solver. Hemos ajustado la anomalía a cada altura y cada estación a una función superposición de cinco ondas sinusoidales:

$$T(x) = \sum_{k=1}^5 A_k \cos(k(x - \varphi_k))$$

(T temperatura; x longitud; k número de onda; φ y A fase y amplitud, respectivamente, de la oscilación con número de onda k). La figura 1 muestra el ajuste de T(x) con la función anterior (rojo) y el residuo (la diferencia entre el ajuste y los datos; verde). Nuestros residuos, próximos a cero, indican que el método funciona adecuadamente. Hay que hacer notar que la oscilación de siete picos que parece presentar el residuo no puede ser ajustada porque hemos considerado un número de onda máximo de cinco.

Nuestros resultados se resumen en la Figura 2, que muestra la amplitud de las oscilaciones con número de onda desde k=1 hasta k=4 en función de la estación, Ls, con Ls correspondiendo a 90 y 270 en verano e invierno, respectivamente, ambos en el hemisferio norte. Todas las mareas estudiadas varían con la altura de modo similar y con máxima amplitud a una altura de 80 kilómetros, con la excepción de la marea k=2 que es máxima a 50 kilómetros. La marea k=3 es la que domina a lo largo de todo el año marciano, alcanzando amplitudes de 8K. El número de onda de esta marea es compatible con una marea diurna (de período veinticuatro horas o, lo que es lo mismo, frecuencia 1 día⁻¹) generada por la orografía del planeta (con número de onda dos). Las mareas k=2, k=3 y k=4 tie-

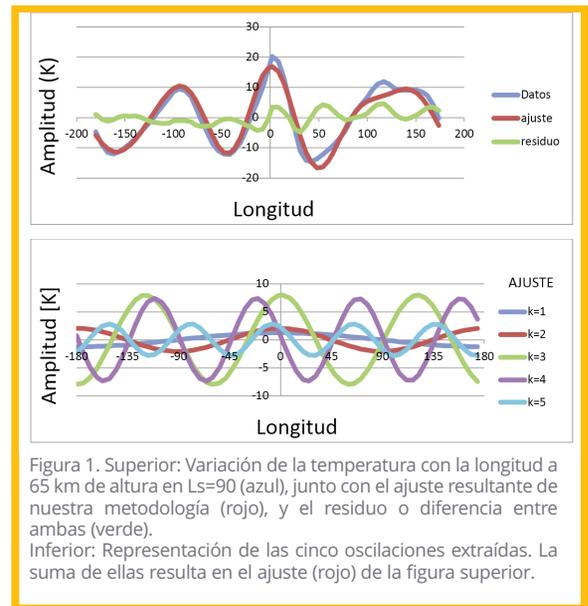


Figura 1. Superior: Variación de la temperatura con la longitud a 65 km de altura en Ls=90 (azul), junto con el ajuste resultante de nuestra metodología (rojo), y el residuo o diferencia entre ambas (verde). Inferior: Representación de las cinco oscilaciones extraídas. La suma de ellas resulta en el ajuste (rojo) de la figura superior.

nen su amplitud máxima en el verano en el hemisferio norte y k=1 en el invierno. Nuestro análisis de la variación de la fase con la altura (no mostrada) indica que todas las ondas se desplazan hacia el este, con una longitud de onda vertical significativamente menor en el caso de k=1 (~45km).

Creemos que nuestro estudio sobre la variabilidad con la altura y la estación de las mareas atmosféricas en la mesosfera de Marte es útil para ayudar a interpretar observaciones de instrumentación a bordo de misiones espaciales. Además, nuestra metodología puede ser aplicada a la caracterización de mareas atmosféricas en cualquier planeta.

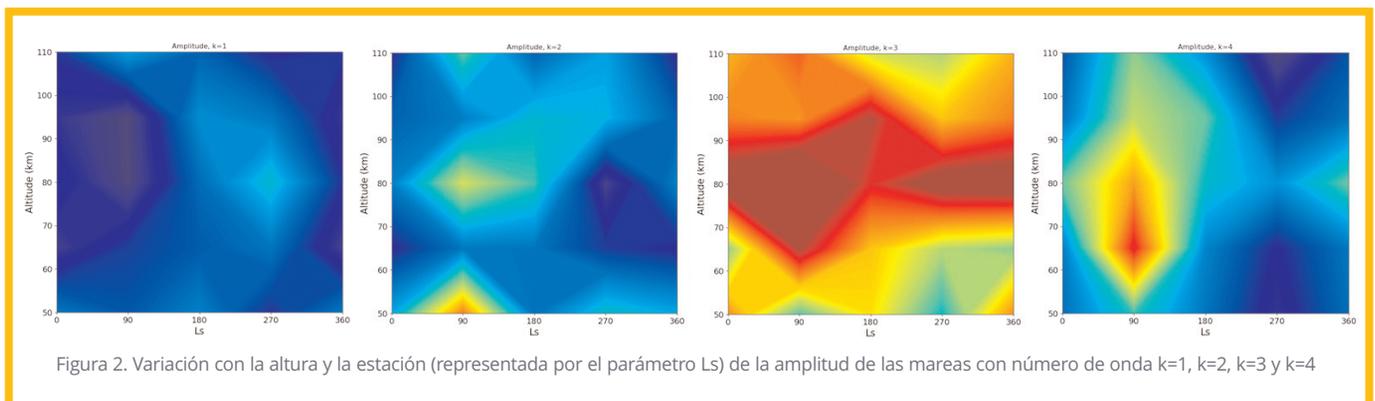


Figura 2. Variación con la altura y la estación (representada por el parámetro Ls) de la amplitud de las mareas con número de onda k=1, k=2, k=3 y k=4

Investigando el universo variable local: el asteroide Diderot

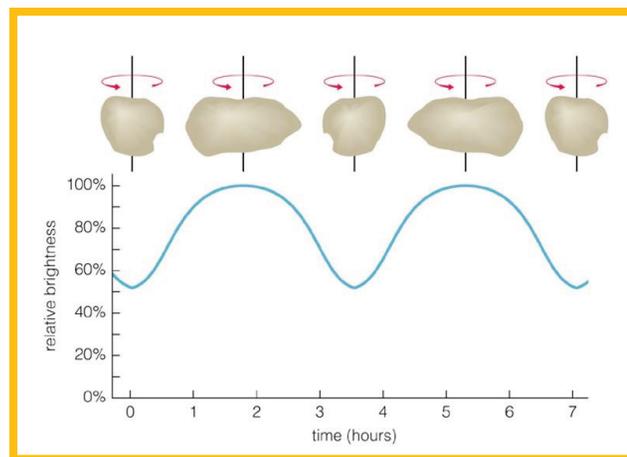
AUTORES: Paula Fabiola Freundlinger López (IES Blas Infante), Andrea García Roa (IES Generalife), José Antonio Gallego Rodríguez (IES Juan XXIII-Zaidín), Jaime Gómez Muñoz (IES Fray Luis), Andrés Marín García (IES Juan XXIII), María Sánchez Martínez (IES Cristo de la Yedra), Francisco Javier Rollin Sáenz de Rodrigáñez (CDP Ntra. Sra. del Pilar), Álvaro Castro Romero (IES Juan XXIII- Cartuja)

TUTORES: Luca Izzo, Sebastiano de Franciscis

El objetivo de nuestro estudio ha sido medir el periodo de rotación de un asteroide a través del método fotométrico de construcción y análisis de su curva de luz. La curva de luz de un cuerpo celeste es una gráfica que representa la intensidad de su luz, emitida o reflejada (en el caso de un asteroide es reflejada de la luz del sol), en función del tiempo. La fiabilidad de la curva de luz de un asteroide para medir su periodo de rotación depende principalmente de la forma y del albedo del asteroide. De hecho cuanto más irregular es la forma, y distinta de una esfera, mayor será la amplitud de oscilación de la curva de luz. Por otra parte, a mayor albedo, o porcentaje de radiación que el cuerpo refleja respecto a la radiación incidente, más definida será la curva. En los asteroides el albedo depende de la composición y, por ejemplo, la roca calcárea muestra mayor albedo que la carbónica.

Nuestro objeto de estudio es el asteroide 5351 Diderot, cuyo nombre procede de Denis Diderot (1713-1784), escritor, filósofo y enciclopedista francés, y figura decisiva de la época de la Ilustración. 5351 Diderot es un asteroide del cinturón principal, con un diámetro de 3.662 kilómetros y un muy alto albedo, de 0.831. Fue descubierto en 1989, pero su periodo de rotación fue desconocido hasta 2018.

Para observar Diderot hemos trabajado con las infraestructuras el Observatorio Astronómico Salvatore di Giacomo (OASDG), de Agerola (SA, Italia). Las observaciones fueron realizadas de forma remota a lo largo de cinco noches, del 19 hasta el 24 de abril 2018, mediante un telescopio Ritchey-Chretien, con un espejo principal de 0.50 metros, operando a f/8, y equipado de una cámara de 2048x2048 píxeles y un filtro Rc (filtro que deja pasar la luz roja, con longitud de onda entre 6000 y 7000 Angstroms). En total recogimos 384 imágenes, cada una con un tiempo de exposición de 180 segundos.



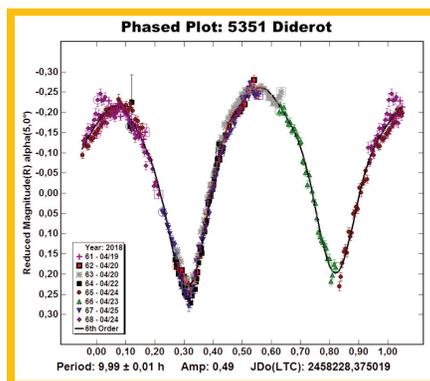
Divididos en tres grupos de estudiantes, hemos analizado de forma independiente los datos fotométricos de Diderot. Para tal fin hemos empleado el software CANOPUS, que usa hasta cinco estrellas de referencia, y su *comp-star selector tool*. Necesitamos medir para cada imagen la luz reflejada del asteroide y a la vez la de unas estrellas de referencia, de magnitud conocida, para eliminar los efectos de la magnitud instrumental y aparente que depende del ancho de la atmósfera, de las condiciones meteorológicas y del polvo interestelar.

Durante el estudio de las estrellas de referencia, dos grupos detectaron que una de ellas mostraba un intervalo de error de luminosidad muy alto, y posteriormente averiguamos que se trataba de una estrella variable Cefeida, un tipo de estrella que presenta una oscilación y magnitud muy regular y que se emplea para medir distancias.

Luego establecimos el periodo de Diderot con el algoritmo de análisis FALC, basado en la transformada de Fourier, que construye un periodograma cortando la curva de luz en fragmentos iguales al periodo a estudiar y trata de que todos solapen. Los tres grupos encontraron periodos de rotación homogéneos: dos de ellos $P = 9.99 \pm 0.01$ horas y un tercero $P = 9.98 \pm 0.01$.

Nuestro resultado fue adelantado hace pocos meses por el grupo de investigación italiano de Marchini et al. (2019), que publicó de forma independiente para 5351 Diderot un periodo de rotación de $P = 9.984 \pm 0.003$.

A pesar de la pena no haber sido los primeros en publicar este resultado por pocos meses, destacamos que nuestros valores de P son perfectamente compatibles con el encontrado por Marchini et al., lo que da mucha fuerza a nuestro trabajo, que ha sido remitido al *Minor Planet Bulletin**.



Arriba. Periodograma de la curva de luz de Diderot, estudiado con el algoritmo de analysis FALC, para obtener su periodo de rotación. Debajo, plot de los resultados obtenidos e imagen del telescopio empleado en el trabajo.

* The rotation period of 5351 Diderot, Luca Izzo et al, MPB, submitted (2019)

Un estudio del cúmulo estelar de las Pléyades basado en los datos Gaia-DR2

AUTORES: Elia del Moral (IES Arabuleila, Cúllar Vega, Granada), Carlos Martín-Morales (Colegio Santo Tomás de Villanueva, Granada)

TUTOR: Emilio J. Alfaro

El estudio del cúmulo estelar de las Pléyades proporciona información básica y fundamental en diversos aspectos de la astronomía moderna. Su cercanía al Sol, su edad, el rango de masas observables y su liviano enrojecimiento lo convierten en un eslabón esencial para el anclaje de la escala de distancia del universo y para el establecimiento de la calibración en flujo absoluto de los diferentes tipos de estrellas que lo pueblan.

La misión espacial Gaia, de la Agencia Espacial Europea (ESA) tiene como objetivo fundamental la obtención de datos astrométricos, fotométricos y espectroscópicos de más mil millones de objetos de la Vía Láctea. Los datos astrométricos incluyen posición sobre la esfera celeste, movimientos propios y paralajes (desviación angular de la posición aparente de un objeto, dependiendo del punto de vista elegido para observarlo). Los fotométricos nos proporcionan el flujo e intensidad luminosa en tres bandas (G, B y R), y los espectroscópicos, la velocidad radial y otros parámetros físicos estelares para una muestra más reducida de objetos.

En este trabajo utilizaremos la información astrométrica y fotométrica de la segunda entrega de datos (Gaia DR2) para determinar la distancia trigonométrica al cúmulo. En primer lugar seleccionaremos los probables miembros del cúmulo, a partir del diagrama de movimientos propios y del diagrama color-magnitud. Por último analizaremos la distribución estadística de los paralajes y distancias, seleccionando el valor central y estimando su precisión a partir del segundo momento (dispersión) de la distribución estadística.

El cúmulo y los datos

Las Pléyades (Melotte 22, M22; ver Fig. 1) está localizado en el segundo cuadrante Galáctico ($l = 166^\circ.199$; $b = -23^\circ.489$) en la constelación de Tauro. Dado que es visible a simple vista, es bien conocido por todas las culturas del hemisferio Norte, recibiendo el nombre popular de las “Las siete hermanas” o “Las siete cabrillas”. Aparece en múltiples obras literarias, desde “La Iliada” de Homero a “El Quijote” de Cervantes. En la mitología griega representan a las hijas de Atlas.

Los datos se han obtenido a partir del repositorio de

datos astronómicos VizieR, que está mantenido por el Observatorio de Estrasburgo. Dado que las últimas determinaciones previas de la distancia a las Pléyades están todas por debajo de 170 pc, se han bajado los objetos con paralajes superiores a seis milarcosegundos y relación señal-a-ruido mayor que cinco, dentro de una caja de $4^\circ \times 4^\circ$ en coordenadas ecuatoriales centrada en el cúmulo.

Metodología, resultados y conclusiones

Hemos utilizado la caja de herramientas *online*, TopCat, para el análisis de los datos. En la Fig. 2 se esquematiza,

en diferentes paneles, el proceso seguido. En la fila superior, el panel a muestra la distribución de los movimientos propios de la muestra completa. Dado que las estrellas del cúmulo deben mostrar un movimiento similar, hemos realizado sucesivas ampliaciones para elegir como probables miembros las regiones más densas de la distribución. En la fila inferior se muestra el diagrama color-magnitud de las diferentes ampliaciones, que a su vez, han sido también

purgadas en este espacio. De tal forma que los diagramas de movimientos propios y color-magnitud de la muestra final de probables miembros, se presentan en los paneles c y e. Finalmente, en el panel f se muestra la distribución las distancias en parsecs (obtenidas como la inversa de la paralaje en segundos de arco). El valor central de la distribución definido por la moda y la media coinciden en 136 pc con una desviación estándar de 6 pc.

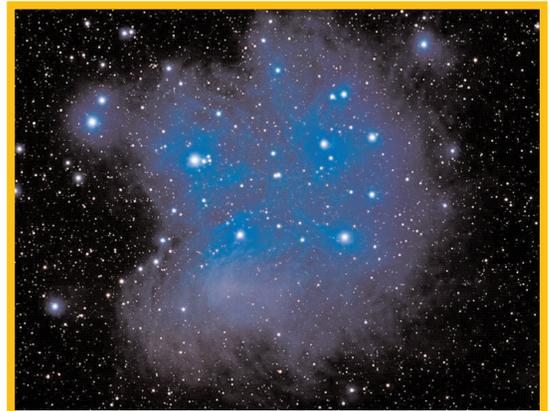


Figura 1. Las Pléyades. El difuminado azul representa la luz de las estrellas del cúmulo reflejada por el remanente gaseoso de la formación estelar. Fuente: Tony Hallas /Science Faction/Corbis).

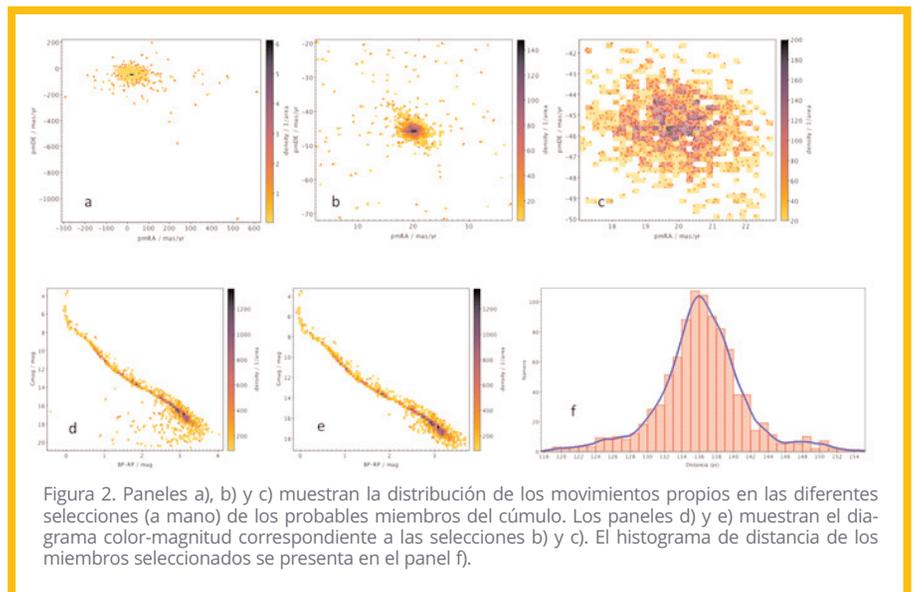


Figura 2. Paneles a), b) y c) muestran la distribución de los movimientos propios en las diferentes selecciones (a mano) de los probables miembros del cúmulo. Los paneles d) y e) muestran el diagrama color-magnitud correspondiente a las selecciones b) y c). El histograma de distancia de los miembros seleccionados se presenta en el panel f).

Análisis de descargas electrostáticas con un espectrógrafo de alta velocidad

AUTORES: Isabel Sánchez Morcillo (IES Jiménez de Quesada), David Montero González (Santo Tomás de Villanueva, PP. Agustinos), Lucio González Pérez (IES Francisco Javier de Burgos), Manuel Hernández Sánchez (IES Pedro Jiménez Montoya)

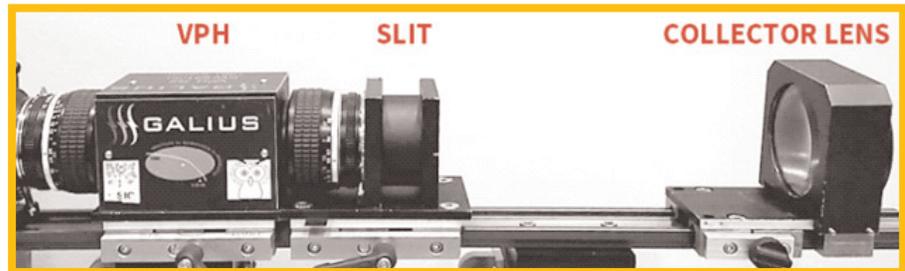
TUTORES: M. Passas-Varo, J. Sánchez, F.J. Pérez-Invernón, F.J. Gordillo-Vázquez.

El proyecto PIISA que hemos preparado consiste en calcular -a partir de una secuencia de imágenes espectrales- la evolución de la temperatura electrónica de un plasma de aire generado mediante una descarga electrostática realizada en el laboratorio de Electricidad Atmosférica. Estas medidas se hicieron con GALIUS (*Granada Lightning Ultrafast Spectrograph*), un espectrógrafo hecho a medida en el IAA, usando un prisma de 1855 líneas por mm basado en una red VPH y una cámara PHOTRON SAZ capaz de grabar a 2,1 Mfps con un sensor de 8 x 128 píxeles para esa velocidad. La resolución media del sistema es de 0.44 nm y el rango espectral que cubrimos es de 587.7 nm - 737.8 nm. Los plasmas de aire con los que hemos trabajado se han generado a partir de un arco eléctrico producido por un generador electrostático, y dado que se trata de plasmas calientes, hemos considerado que el plasma se encuentra en equilibrio térmico. En estas condiciones la temperatura electrónica es igual a la temperatura del gas y podemos calcularla a partir de la ecuación de abajo donde aparecen una serie de parámetros que se pueden medir en el espectro de dicha descarga y de ciertas constan-

$$T = \frac{\epsilon_m - \epsilon_n}{k \ln \left(\frac{I_{nr} g_m A_{mp} v_{mp}}{I_{mp} g_n A_{nr} v_{nr}} \right)}$$

tes atómicas que se encuentran tabuladas: Si llamamos m al estado energético asociado a la emisión de la línea 661.056 nm del ión de nitrógeno, y n al estado energético asociado a la emisión de la línea 648.205 nm del ión de nitrógeno, encontramos las siguientes constantes:

ϵ_n : Potencial de excitación del n-ésimo nivel energético
 I_{nr} : Intensidad de la línea de emisión emitida al pasar del nivel energético n al r
 g_n : Peso estadístico del n-ésimo nivel energético
 A_{nr} : Coeficiente de emisión de Einstein para la transición del nivel energético n al r, que es la probabilidad por unidad de tiempo de que un átomo en un estado energético emita espontáneamente y de



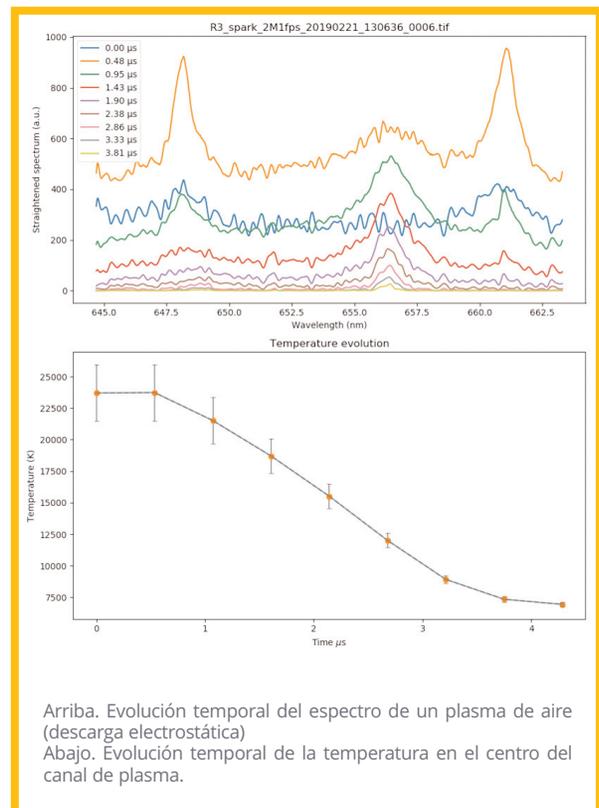
que haya una transición hacia un estado energético inferior
 u : Frecuencia del fotón emitido en s-1
 k : Constante de Boltzmann

De manera que una vez medido el espectro del plasma de aire a 2.1 Mfps, calculamos el cociente entre las áreas bajo los picos de las líneas en 661.056 nm y 648.205 nm del ión de nitrógeno y conociendo los valores de las constantes anteriores, somos capaces de estimar la temperatura electrónica para ese espectro y para ese instante de tiempo. Pero primero hay que reducir los datos para poder hacer este cálculo.

Para ello generamos una matriz de calibración en longitud de onda con un software en Python que hemos desarrollado, wcalR3.py. Este software toma como entrada las imágenes espectrales de una lámpara de Neón, asignando una longitud de onda a cada píxel de la imagen. A continuación, con fluxcal.py, generamos la función instrumental de GALIUS para R3 para corregir las inhomogeneidades de la CMOS y la respuesta no uniforme en función de la longitud de onda.

Por último, con miraf_piisa.py cargamos las imágenes espectrales, les quitamos el fondo y les

pasamos la matriz de calibración en longitud de onda, de manera que el espectro se enderece. Por último, los multiplicamos por la función instrumental para corregir la respuesta inhomogénea del sensor del instrumento. Además, calculamos la temperatura electrónica directamente con la ecuación que mencionamos anteriormente, así como su error asociado usando un método de remuestreo estadístico.



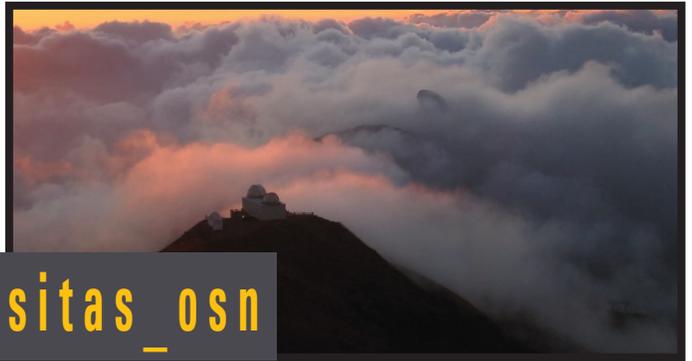
Arriba. Evolución temporal del espectro de un plasma de aire (descarga electrostática)
 Abajo. Evolución temporal de la temperatura en el centro del canal de plasma.

DESTACADOS

ESTE VERANO, SÚBETE A UN OBSERVATORIO

El Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) y el Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM) desea brindar a los ciudadanos la posibilidad de visitar el Observatorio de Sierra Nevada y la Radioantena de 30 metros durante este verano. Las actividades se realizarán en colaboración con el Albergue Universitario de Sierra Nevada y Azimuth, empresa especializada en la enseñanza y divulgación de la ciencia, y en particular de la astronomía

Fechas y plazas: 27 de julio, 3 y 24 de agosto. 40 personas por día.



divulgacion.iaa.csic.es/visitas_osn

EL ASTRÓNOMO INDIGNADO

Escondido en los sotanos del Instituto de Astrofísica de Andalucía se encuentra un astrónomo oscuro, apartado del sistema, con un índice h negativo, pero con una misión: ser el azote de la mala astronomía... de la mala ciencia. Vuelve el Astrónomo Indignado. ¡Nos llevan los nervios!

youtube.com/iaaudc



THE QUEST, SERIE DE ANIMACIÓN

The QuEST es una serie de animación de carácter educativo que aborda preguntas sobre la física solar y sobre los objetivos científicos de Telescopio Solar Europeo (EST). Disponible en el canal EST de youtube, busca comunicar la física solar a adultos y adolescentes de forma informativa y entretenida.

<http://www.est-east.eu>



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.

radioscopio.iaa.es

CHARLAS DIVULGATIVAS PARA COLEGIOS

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