

64

JULIO DE 2021
revista.iaa.es

IAA

Información y actualidad astronómica

Revista de divulgación del Instituto de Astrofísica de Andalucía

Encuentros temporales entre astronomía y prehistoria



De fondo, imagen del centro de la Vía Láctea, donde se encuentra el agujero negro central Sagitario A*. Situado a 28000 años luz, la luz que recibimos de esta región se emitió cuando algunos de nuestros antepasados más antiguos como especie (*Homo Sapiens*) pintaban en las cuevas de Altamira ciervos como los que caminan sobre la página. NASA, JPL-Caltech, Susan Stolovy (SSC/Caltech) et al.



CSIC

Directora: Silbia López de Lacalle. **Comité de redacción:** Antxon Alberdi, Carlos Barceló, Sara Cazzoli, 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: 833-20-069-5
e-NIPO: 833-20-070-8
Depósito legal: GR-605/2000
ISSN: 1576-5598

SUMARIO

Encuentros temporales entre astronomía y prehistoria ...	3
Tercer año del proyecto Severo Ochoa del IAA ...	5
Deconstrucción. Visitantes interestelares ...	12
Historias ... La máquina en el desierto ...	14
El Moby Dick de ... Antonio Claret (IAA-CSIC) ...	16
Actualidad ...	17
Sala limpia ...	20
Pilares e incertidumbres ...	22

NUBES NOCTILUCENTES DESDE EL OBSERVATORIO DE SIERRA NEVADA

Desde el Observatorio de Sierra Nevada (OSN), gestionado por el IAA, se han observado nubes noctilucentes, cuya presencia se considera un indicador del cambio climático.

Las nubes noctilucentes (NLC) están formadas por partículas de hielo de agua que cristalizan alrededor de material meteorítico a unos 80 y 90 kilómetros de altura (mesopausa) durante el verano polar. La mesopausa en el verano es la región más fría de la atmósfera, y puede alcanzar temperaturas inferiores a 125 grados bajo cero. Desde hace unos años, las NLCs se observan a latitudes cada vez más bajas. Su posible relación con el cambio climático se debe a dos factores: por un lado, la disminución de temperatura alrededor de la mesopausa asociada al aumento del dióxido de carbono, que -al contrario que en la superficie- enfría esa región atmosférica y está generando mesopausas lo suficientemente frías como para que cristalice el agua a latitudes más bajas; por otro lado, el incremento en vapor de agua atmosférico asociado al incremento de metano y cuyo reservorio resultante favorece la formación de nubes. La presencia de estas nubes indica que estas condiciones ya han alcanzado los alrededores de Granada. Fuente imagen: Alfredo Sota (OSN).



Encuentros temporales entre astronomía y prehistoria

Enrique Pérez Montero (IAA-CSIC) y Juan F. Gibaja Bao (EEHAR-CSIC)

Entre las estrategias que usa la ciencia para facilitar el entendimiento de la naturaleza se encuentra la de proporcionar medidas que ayuden a fijar en una escala espaciotemporal aquellos objetos o eventos que estudia. No obstante, si el objeto de estudio sobrepasa las escalas que nos son familiares, puede ser complicado hacerse una idea de lo que esos números representan.

Uno de los casos donde esto ocurre de forma más clara es en la astronomía. Suele ser muy complejo distinguir la diferencia entre los cientos de miles de kilómetros a los que un asteroide ha pasado de la Tierra (en algunos medios a veces se dice que nos ha pasado rozando), y los miles de millones de pársecs (unidad de longitud equivalente a 3,26 años luz) a los que se encuentra la última galaxia de turno que ha roto el récord de distancia en el universo.

Esto mismo sucede incluso con escalas más pequeñas y cercanas, como la histórica. Al hablar de la prehistoria metemos en el mismo saco temporal a los primeros homínidos de hace unos 2.5 millones de años y a los últimos cazadores-recolectores del Mesolítico, que habitaron en ciertas zonas del Atlántico y del Norte de Europa hace cerca de 5.000 años.

En el caso de la astronomía, una escala de distancia que trata de solventar esta dificultad es la basada en la velocidad de la luz, que viaja a unos 300.000 kilómetros por segundo. En el entorno de nuestro planeta esta escala no resulta práctica, ya que a un rayo de luz le da tiempo a dar siete vueltas y media a la Tierra en un solo segundo. Sin embargo, resulta mucho más cómodo y fácil imaginar que



Nebulosa de la Mariposa. NASA, ESA y Hubble SM4 ERO Team.

el Sol, la estrella que ilumina cada día nuestras vidas, está a ocho minutos y veinte segundos de distancia luz, en vez de expresar que está a ciento cincuenta millones de kilómetros. Es decir, podríamos recordar qué hicimos durante esos ocho minutos y veinte segundos transcurridos desde que los primeros rayos salieron del sol y llegaron a nuestro planeta.

EL NACIMIENTO DE LA ESCRITURA Y LA NEBULOSA DE LA MARIPOSA

Para poder entender la magnitud de la que hablamos proponemos hacer coincidir varios eventos de la historia de la humanidad con la distancia luz a la que se

encuentran algunos de los objetos astronómicos más notables. Así, por ejemplo, tomemos como punto de partida de nuestro viaje el momento en que se fija el inicio de la historia, el nacimiento de la escritura hace unos 3.500 años en Mesopotamia, en el extremo oriental del Mediterráneo. Poco después de ese momento partió la luz que los telescopios captan hoy en día desde la nebulosa de la Mariposa, también denominada NGC 6302, a 3.400 años luz en la dirección de la constelación de Escorpio. Estas nubes de gas se produjeron cuando una estrella de masa intermedia, más o menos como nuestro Sol, terminó de fusionar los últimos elementos ligeros que se encuentran



Pinturas de la cueva de Altamira.
Museo de Altamira y D. Rodríguez.

en el núcleo para crear otros más pesados. En ese momento, dicho núcleo se compactó para formar una enana blanca y las capas externas fueron eyectadas al medio interestelar.

¿QUÉ PASÓ EN EL CIELO DURANTE EL INICIO DEL NEOLÍTICO?

Otro momento relevante del desarrollo de la humanidad es el inicio de la domesticación de animales y vegetales, lo que conocemos como Neolítico. Aunque las primeras evidencias se documentan en Oriente Próximo hace unos diez mil años, en pocos siglos aquellas comunidades ocuparon toda Europa. Sin duda, nosotros y nosotras somos sus más directos herederos. En ese mismo momento el cúmulo globular Messier 22, a diez mil cuatrocientos años luz de distancia, emitió la luz que hoy podemos ver. Este cúmulo se sitúa en la dirección de la constelación de Sagitario y se halla muy cerca del bulbo de nuestra galaxia. Está formado por una asociación de decenas o centenares de miles de estrellas, algunas de las cuales se cuentan entre las más antiguas de la Vía Láctea.

Hoy en día los observatorios infrarrojos espaciales y radiotelescopios de la Tierra recogen la radiación electromagnética que salió hace 28.000 años de Sagitario A*, que es como se denomina al núcleo de nuestra galaxia. Hoy sabemos que en el centro de la Vía Láctea hay un agujero negro supermasivo con una masa equivalente a cuatro millones de veces la de nuestro Sol. La presencia de un agujero negro tan enorme en esta posición no es algo anormal, sino un hecho común a todas las galaxias de tamaño similar a la nuestra.

Cuando la radiación electromagnética ini-

ció su camino hacia la Tierra, algunos de nuestros antepasados más antiguos como especie, el Homo Sapiens, entraban en las cuevas de Altamira para pintar los magníficos bisontes, ciervos, manos y signos tan enigmáticos para la sociedad en la actualidad.

EL ORIGEN DEL HOMO SAPIENS Y LA GRAN NUBE DE MAGALLANES

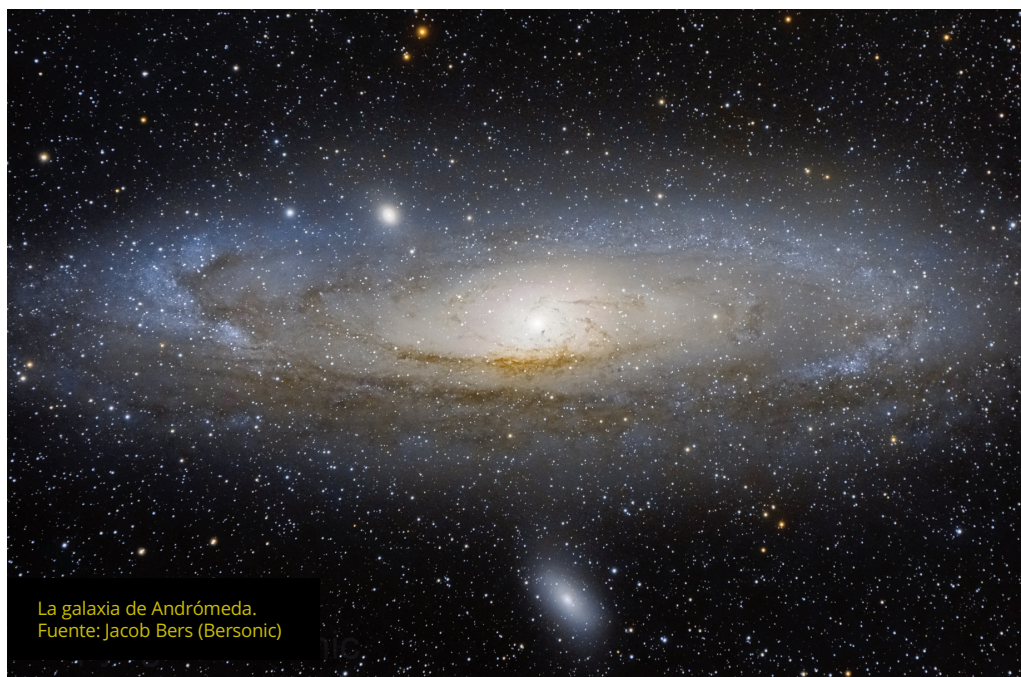
Los Homo Sapiens aparecieron en África hace unos 150.000 años, momento en el que la luz que hoy captamos emergía de la Gran Nube de Magallanes, más allá de los límites de nuestra galaxia. Esta es la más brillante entre las numerosas galaxias enanas satélite de la Vía Láctea. En ella se encuentra la nebulosa de la Tarántula, donde se halla el criadero de estrellas más masivo de todo nuestro Grupo Local de galaxias. En esta región

se están creando más de diez nuevas estrellas por año y algunas de ellas son tan masivas que provocan vientos galácticos que arrastran el gas a cientos de kilómetros por segundo.

LOS PRIMEROS HOMÍNIDOS Y LA GALAXIA DE ANDRÓMEDA

Finalmente, si mirásemos por una máquina del tiempo qué ocurría en la Tierra hace dos millones y medio de años, observaríamos el origen de la humanidad. En aquel momento, nuestros tatarabuelos, los Homo Habilis, habitaban en África y comenzaban a hacer algo que ninguna especie en nuestro planeta había hecho: transformar la naturaleza para crear instrumentos. Es el inicio de la tecnología, los primeros pasos de lo que hoy son nuestros móviles, telescopios o naves espaciales. Precisamente, a esa distancia espaciotemporal se encuentra la galaxia de Andrómeda, o M31. Es el objeto más cercano a la Vía Láctea de un tamaño y masa parecidos. Su descubrimiento, realizado en la década de 1920 gracias a Edwin Hubble, nos concienció de que las galaxias eran numerosas y la nuestra no constituía todo el universo.

Todavía nos parece irreal pensar que su luz haya viajado más tiempo del recorrido por nuestra especie desde nuestro tatarabuelo Habilis. Y eso que es la galaxia más cercana a nosotros, en un universo que alberga miles de millones de ellas. Todo un desafío para nuestra comprensión sobre su inmensidad.



La galaxia de Andrómeda.
Fuente: Jacob Bers (Bersonic)

Tercer año del proyecto Severo Ochoa del IAA

EL PROYECTO ABARCA DESDE LA COMPRENSIÓN DE LOS SISTEMAS PLANETARIOS, PASANDO POR LA FORMACIÓN DE ESTRELLAS EN LA VÍA LÁCTEA Y EL UNIVERSO LOCAL, HASTA LA EVOLUCIÓN GALÁCTICA Y LA COSMOLOGÍA

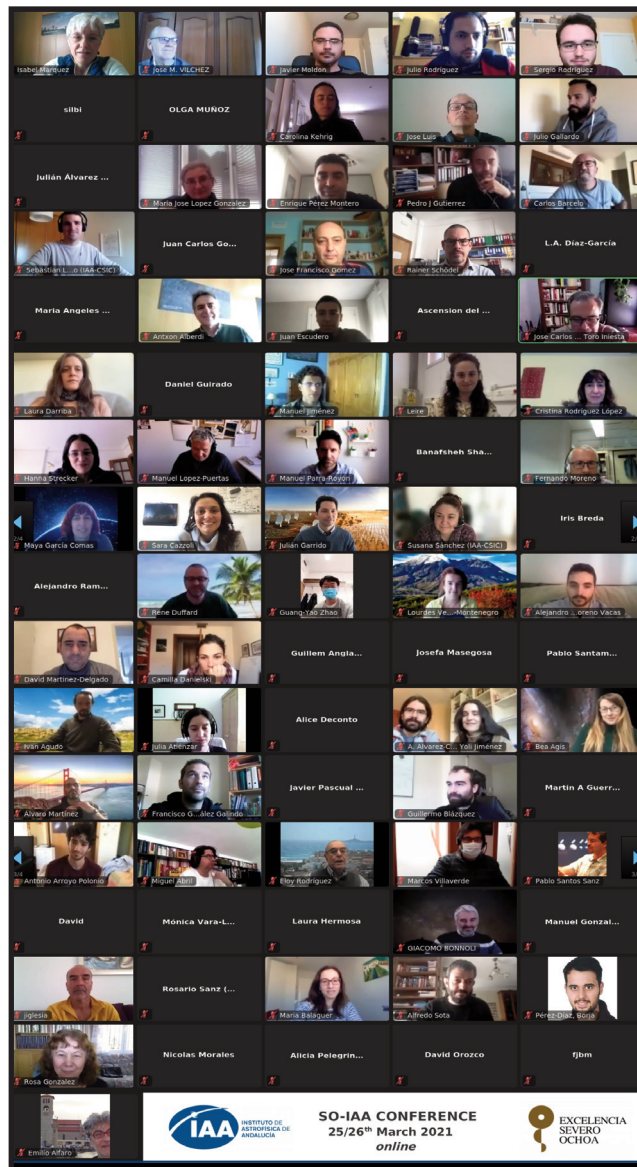
Isabel Márquez
(dirección científica del SO-IAA)

A la fecha de publicación de este nuevo número de la revista *Información y Actualidad Astronómica*, se habrán cumplido tres años de nuestro distintivo Severo Ochoa (SO-IAA). *Tempus fugit*, especialmente cuando casi la mitad de ese periodo lo hemos vivido bajo la pesadilla de la COVID-19, de la que aún no nos hemos despertado del todo. A pesar del encierro inicial, y de los impedimentos o dificultades para desarrollar nuestro trabajo investigador, las personas del IAA-CSIC hemos mostrado nuestra capacidad de responder a la adversidad con motivación, entusiasmo y capacidad de reinventar

lo necesario para seguir adelante. Nada puede sustituir a la interacción presencial, pero hemos tratado de suplirla con otros mecanismos. La pantalla nos ha conectado en multitud de actividades propias del centro, y también para recibir a las nuevas incorporaciones; hemos cambiado nuestros coloquios del SO-IAA a “webloquios”, experiencia

que ha resultado ser muy positiva y productiva, también para otros centros en la comunidad astrofísica nacional. Nos hemos encontrado, de forma virtual, en las Jornadas SO-IAA que celebramos el pasado marzo, y que han supuesto una magnífica oportunidad para mostrar el excelente trabajo que se está realizando en el contexto del plan estratégico del SO-IAA, con mención especialísima al personal contratado y su capacidad de incorporación al centro, incluso en estos tiempos tan complejos. Estas jornadas permitieron hacer partícipe a todo el instituto de la ciencia que han aportado al centro nuestras nuevas incorporaciones. Si en un número anterior de la revista se presentaban las incorporaciones al SO-IAA en las primeras convocatorias, ahora es el turno de quienes forman parte de nuestra comunidad desde hace un año, o poco más. Se ocupan de cuestiones científicas y metodológicas centrales para el SO-IAA. Por un lado, del estudio del centro de la Vía Láctea, con datos de exquisita resolución espacial, del entorno más próximo a los agujeros negro supermasivos

con el EHT, y de cómo evolucionan las galaxias utilizando el cartografiado JPAS. Por otro, desde la perspectiva para nuevos materiales ópticos, hasta la participación en proyectos instrumentales de vanguardia, como MOSAIC para el ELT y el prototipo de *SKA Regional Center*, que lideramos desde el IAA.



Julia Atiénzar

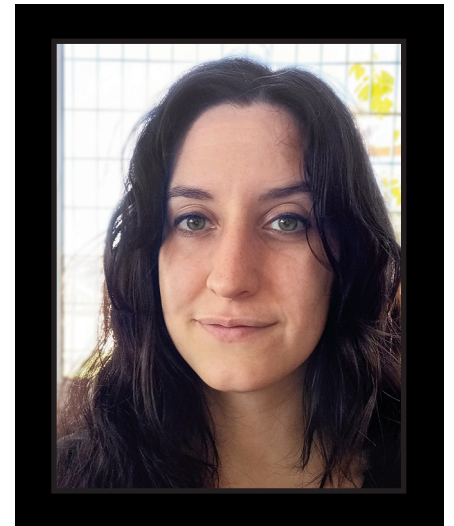
DISPOSITIVOS ÓPTICOS MÁS EFICIENTES PARA EL ESTUDIO DEL SOL

Interesada por la astronomía desde pequeña, estudié el grado en física en la Universidad Complutense de Madrid, donde fui ganando interés en la parte óptica y de instrumentación científica. Ese hecho me llevó a trabajar en el Instituto de Óptica del CSIC, primero en el Grupo de Procesado Láser y más tarde realizando mi TFM del máster en tecnologías ópticas y de la imagen.

Ahora, por fin, reunida de nuevo con la astrofísica en el IAA gracias al programa Severo Ochoa, llevo a cabo mis tareas como ingeniera óptica en colaboración con el Grupo de Física Solar. Entre ellas, se encuentran la calibración de diversos instrumentos como TuMag (*Tunable Magnetograph*), magnetómetro que volará en el globo estratosférico Sunrise III y PHI

observaciones de alta precisión polarimétrica y espectroscópica en las capas más altas de la atmósfera solar, como son la cromosfera y la corona, es fundamental para la comprensión del campo magnético solar.

Para el análisis espectroscópico, los interferómetros de Fabry-Pérot (también llamados etalones) son ampliamente usados en instrumentación astronómica. Estos dispositivos consisten en finas láminas de material transparente cuyas múltiples reflexiones de la luz incidente entre sus superficies crean un patrón de interferencia con un perfil de transmisión espectral caracterizado por picos muy estrechos, de fracciones de nanómetro, a determinadas longitudes de onda que dependen de los parámetros intrínsecos del etalón, como



birrefringencia. Esto es, una división del haz de luz en dos haces que viajan a través del material a diferentes velocidades, por tener diferentes índices de refracción según la dirección de propagación, y con estados de polarización perpendiculares entre sí. El etalón se comporta entonces también como un polarizador y/o retardador. Estos efectos degradan las medidas ya que modifican la información polarimétrica de la luz proveniente de la atmósfera solar. Es por ello que es necesario realizar un estudio exhaustivo de las propiedades electro-ópticas y la birrefringencia de este tipo de materiales.

En los últimos años, el IAA ha realizado un gran esfuerzo desde el punto de vista teórico en el estudio de los etalones, incluyendo sus propiedades birrefringentes. Ahora, los cálculos teóricos han de contrastarse con medidas en laboratorio, para lo cual estamos desarrollando un instrumento que permitirá caracterizar las propiedades ópticas y polarimétricas de elementos ópticos, así como sus efectos en la calidad del frente de onda transmitido.

El estudio que planteamos no solo mejoraría la corrección de los efectos perjudiciales de la birrefringencia en medidas espectropolarimétricas, sino que permitiría la creación de innovadores instrumentos donde los etalones podrían llevar a cabo al mismo tiempo las funciones de barrido en longitudes de onda y del análisis de la polarización. Se conseguirían así diseños con un número más reducido de elementos, más simples y livianos, que posibilitarían un mejor aprovechamiento del número de fotones recibidos, con lo que se podría acceder a un nivel de detalle nunca antes alcanzado en las estructuras magnéticas solares.



Imagen de una protuberancia solar, donde el gas sigue las líneas de campo magnético del Sol. Fuente: NASA/SDO/AIA.

(*Polarimetric and Helioseismic Imager*), a bordo de la misión *Solar Orbiter*, el desarrollo de diseños ópticos para la fase de diseño conceptual del coronógrafo CMAG de la misión *Lagrange* (ESA), que se encuentra todavía en sus primeras etapas y, finalmente, en la caracterización experimental de materiales ópticos utilizados en el estudio polarimétrico de la atmósfera solar.

Los instrumentos mencionados anteriormente tienen dos cosas en común: todo ellos funcionan como polarímetros y como instrumentos de imagen. La obtención de

son el grosor o el índice de refracción.

Los etalones pueden fabricarse también a partir de cristales electro-ópticos. Al aplicar un voltaje sobre este tipo de cristales, se modifica la distribución de su carga eléctrica produciendo una variación en el índice de refracción, lo que convierte al etalón en un dispositivo sintonizable con el que podemos barrer sobre un rango de longitudes de onda con mucha precisión.

Sin embargo, este efecto introduce una anisotropía en el comportamiento óptico del material, que provoca para la mayoría de ángulos de incidencia un efecto de

Luis Alberto Díaz

TRAZANDO EL ENSAMBLADO DE LAS GALAXIAS

Tras mis primeras andaduras por la física en mi Salamanca natal, tomé la decisión de salir de la que hasta entonces había sido mi única ciudad y adentrarme en el campo de la astrofísica. Es aquí cuando comencé una tesis doctoral en poblaciones estelares en el Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA) con la que finalmente obtuve el título de Doctor Cum Laude por la Universidad Complutense de Madrid en 2017. A pesar de que mi tesis se basó en el estudio observacional de la formación y evolución de galaxias, me mudé laboralmente al *Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics* (ASIAA, Taiwán), donde complementé mi formación postdoctoral en algo mucho más teórico como son las lentes gravitacionales en cúmulos de galaxias (*weak lensing*) y el plano fundamental de cúmulos.

Tras el confinamiento a mediados de 2020, pude regresar a España gracias al programa Severo Ochoa. Este programa me permitió retomar el tema principal de mi tesis, las poblaciones estelares, con el gran aliciente de realizarlo en un centro de repercusión internacional como es el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) rodeado de grandes profesionales en la materia.

La línea de investigación que estoy desarrollando dentro del IAA se centra en la determinación y evolución de las poblaciones estelares de galaxias dentro del cartografiado J-PAS. En palabras más simples, consiste en determinar qué tipos de estrellas pueblan los diferentes tipos de galaxias, ya que dependiendo del tipo de galaxia su contenido estelar puede variar y estas pueden presentar estrellas muy jóvenes, o muy evolucionadas, con alto contenido en metales, etc.

El cartografiado J-PAS observará un quinto del cielo usando 59 filtros distribuidos en el rango óptico, lo que equivale al rango espectral que vemos los humanos (del color azul

al rojo) más un poquito de infrarrojo (como las cámaras térmicas). Esto será equivalente a tomar 59 fotos del cielo usando diferentes filtros que medirán la intensidad de cada uno de los colores de las galaxias. Esta configuración hace que J-PAS sea excelente a la hora de determinar el contenido estelar de las galaxias y estimar la distancia, o *redshift*, a la que se encuentran. J-PAS presenta un gran atractivo para nosotros, ya que al tener la luz una velocidad finita, la imagen que tenemos de las galaxias más alejadas es en realidad un reflejo de su pasado por el mero hecho de que la luz ha tardado más tiempo en viajar hasta nosotros. Esto nos permite crear una especie de película donde disfrutáramos viendo cómo las diferentes estrellas van apareciendo dando forma al ensamblado galáctico, en la que sus primeros fotogramas corresponderían a las galaxias más lejanas de J-PAS y cuyo final serían las galaxias más cercanas a nuestra Vía Láctea.



En particular, con J-PAS podremos trazar la película o historia de formación estelar de las galaxias desde hace ocho mil millones de años (más de la mitad de la edad del universo). Para esta tarea estamos desarrollando técnicas de análisis adaptadas para J-PAS que en el gremio se conocen como *SED-fitting*. Esta metodología está basada en comparar las intensidades de las 59 bandas que hemos observado para cada galaxia, poniendo especial énfasis en aquellos filtros que nos cuentan detalles de sus poblaciones estelares, como por ejemplo su edad. Todo esto basado en la comparación con modelos que hemos construido a partir de lo que conocemos sobre las estrellas en nuestra vecindad solar y sobre los cúmulos de estrellas de la Vía Láctea. Hasta el día de hoy, estas líneas de investigación se desarrollaban mayormente con espectroscopía, que a pesar de ofrecer una mayor resolución frente a la fotometría, también presenta ciertas desventajas, como por ejemplo la necesidad de mayores telescopios con requerimientos técnicos más exigentes o un mayor tiempo de observación por galaxia que muchas veces obliga a realizar una selección previa de la muestra. Estas desventajas son ampliamente paliadas con cartografiados tipo J-PAS, por lo que esperamos que nuestra línea de investigación tendrá un gran impacto a la hora de determinar la historia de formación estelar de las galaxias desde un punto estadísticamente más robusto y completo.

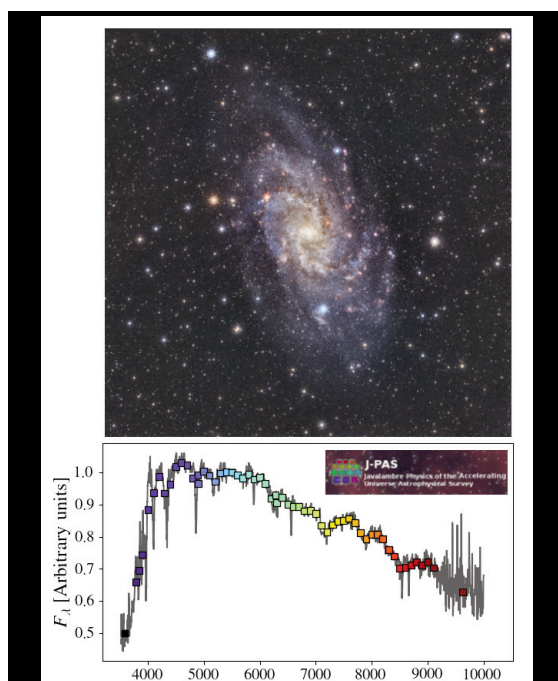


Imagen de la galaxia del Triángulo o M33 (panel superior) junto con su espectro y la fotometría integrada a la resolución de J-PAS (panel inferior). Fuente: CEFCA y *Spectral library of galaxies, clusters, and stars* (Santos, 2002)

Julián Garrido

CIENCIA ABIERTA CON EL SQUARE KILOMETRE ARRAY

A veces uno mismo se pregunta cómo ha logrado llegar a un centro como el Instituto de Astrofísica de Andalucía. Todos en algún momento llegamos a un punto en el que tenemos que decidir qué camino queremos tomar, y para ello ponemos en práctica la toma de decisiones multicriterio, que nos permite encontrar soluciones a cuestiones o problemas complejos teniendo en cuenta tanto criterios objetivos como subjetivos, otorgándoles a cada uno de ellos un peso diferente.

Esta técnica de toma de decisiones, en combinación con otras técnicas de inteligencia artificial, la utilicé también en la investigación de mi tesis doctoral en la Universidad de Granada. Desarrollé un sistema inteligente capaz de evaluar el riesgo ambiental de cualquier actividad potencialmente contaminante, entre las que podría encontrarse la construcción de una infraestructura científica en mitad de un paraje natural protegido, como suele ser el caso de la localización de los observatorios de astronomía, ya que generalmente necesitan estar alejados de núcleos urbanos.

Me especialicé en técnicas de web semántica y en la aplicación de lógicas descriptivas a la resolución de problemas científicos. Es decir, utilicé lenguajes orientados a representar conocimiento formal de manera que permita a un computador “razonar”. Para mi sorpresa, esto me abrió la puerta al IAA en 2012.

En el marco de un proyecto europeo que ha sido referencia en el ámbito de la ciencia abierta, colaboré en el desarrollo e implementación de un software de procesado científico (Taverna), con el fin de adaptarlo

para que pudiera usarse para acceder y procesar datos de astronomía. El desarrollo de AstroTaverna, de nombre tan simpático, fue el que me introdujo en el mundo del software abierto (a veces referido como libre, aunque se trate de conceptos diferentes). Fue muy enriquecedor evolucionar hacia el uso de un modelo de desarrollo de software colaborativo y abierto, permitiendo así trabajar sobre el mismo código y de forma simultánea a personas situadas en distintos países.

Esta investigación estuvo enmarcada en las actividades preparatorias para la construcción y explotación del proyecto SKA, que tiene como objetivo construir dos radiointerferómetros con miles de antenas repartidas entre Australia y África. Tal es la magnitud de este coloso, que ha sido necesaria la creación de once consorcios internacionales para diseñar los distintos elementos que lo componen. En concreto, yo participé en el consorcio para el diseño del procesador de datos científicos y actué como *Project Manager* de la coordinación de la participación española en el SKA. Las actividades de diseño del proyecto SKA terminaron en 2019 y precisamente este año va a iniciarse la construcción de esta megainfraestructura.

Los datos que produzca el SKA (600PB/año) serán enviados a una red de centros regionales que permitirán su almacenamiento y análisis. Desde 2017 estamos trabajando en el diseño y prototipado de un centro regional de SKA en el IAA con el fin de contribuir a que la comunidad española esté preparada para abordar los desafíos científicos y técnicos a los que se enfrentará.



El programa Severo Ochoa del IAA apoya estas actividades y ha dado un empuje clave a la labor que realizamos. En particular, yo formo parte del equipo de desarrollo del protoSRC y disfruto actualmente de un contrato Severo Ochoa, mediante el cual contribuyo a diseñar el archivo científico y promover los principios de la ciencia abierta, que son elementos esenciales para favorecer la transversalidad y las sinergias.

Asimismo, estoy contribuyendo a la investigación de nuevas formas de representación de información que permitan describir la historia y transformaciones que se han aplicado a los datos, así como métodos alternativos para acceder a los datos y para su visualización. Todas estas son cuestiones necesarias, puesto que el gran tamaño de los datos de SKA hará que no se puedan preservar los datos brutos producidos tras la observación y por la misma razón tampoco podremos descargarnos los datos a nuestro propio ordenador para su análisis. Sin duda, trabajar en el IAA me proporciona la oportunidad de contribuir a la generación de nuevo conocimiento y abordar nuevos desafíos.



Concepción artística del Observatorio SKAO.

Sergio Rodríguez

UN ESPECTRÓGRAFO PARA EL ELT, EL TELESCOPIO ÓPTICO E INFRARROJO MÁS GRANDE DEL MUNDO

Dados mis 23 años mi experiencia profesional puede no ser tan extensa como la de otras personas que escriban un artículo similar en esta revista. Hace dos años (en junio de 2019) obtuve mi grado en ingeniería electrónica industrial por la Universidad de Granada y a finales de 2020 terminé el máster en sistemas electrónicos para entornos inteligentes por la Universidad de Málaga compaginándolo, durante diez meses, con mi trabajo como ingeniero electrónico en una empresa encargada del diseño y desarrollo de faros y pilotos para algunas de las grandes marcas de automoción del mundo. Sin embargo, cuando recibí la oportunidad de unirme al IAA para este proyecto no tardé en decidirme. Para alguien que hacía menos de un año lidiaba con los circuitos electrónicos de su proyecto fin de grado, pensar que mi trabajo se instalaría en el mayor telescopio óptico e infrarrojo construido y que sería utilizado por científicos de todo el mundo para estudiar los misterios del universo era, simple y llanamente, emocionante.

El *Extremely Large Telescope* (ELT) será, una vez esté construido, el telescopio óptico e infrarrojo más grande del mundo, y uno de los varios instrumentos que incorporará será MOSAIC, el proyecto en el que trabajo.

MOSAIC es un espectrógrafo multiobjeto que trabaja en el espectro visible y en el infrarrojo cercano. Este artículo busca ser en cierta forma divulgativo y, por los comentarios recibidos de familiares y amigos, las primeras preguntas que surgen son ¿qué es un espectrógrafo? Y, ¿cuál es la función de un espectrógrafo en un telescopio?

De la misma forma que un prisma separa la luz en colores para obtener un arcoíris, un espectrógrafo recoge la luz emitida por

un cuerpo celeste y la separa en sus distintas longitudes de onda. Lo importante de todo esto y la razón por la que se usan los espectrógrafos en astronomía reside en que cada elemento químico o molécula absorbe y emite en unas longitudes de onda distintas, por lo que analizando el espectro producido por un cuerpo es posible conocer la composición del mismo. Es más, usando análisis más complejos del espectro es posible obtener información sobre la temperatura y la densidad del cuerpo, la velocidad a la que se acerca o aleja de la Tierra (incluyendo la distancia), o incluso del campo magnético del cuerpo.

El objetivo del espectrógrafo consiste en estudiar en detalle el espectro producido por el cuerpo observado. Sin embargo, el mismo instrumento y el telescopio se encuentran emitiendo radiación infrarroja debido a su temperatura. Dicha radiación puede influir y contaminar el espectro estudiado, lo que provocaría que las lecturas obtenidas no fuesen útiles. Por ello, es necesario enfriar el interior del instrumento todo lo posible hasta niveles criogénicos (cerca del cero absoluto).

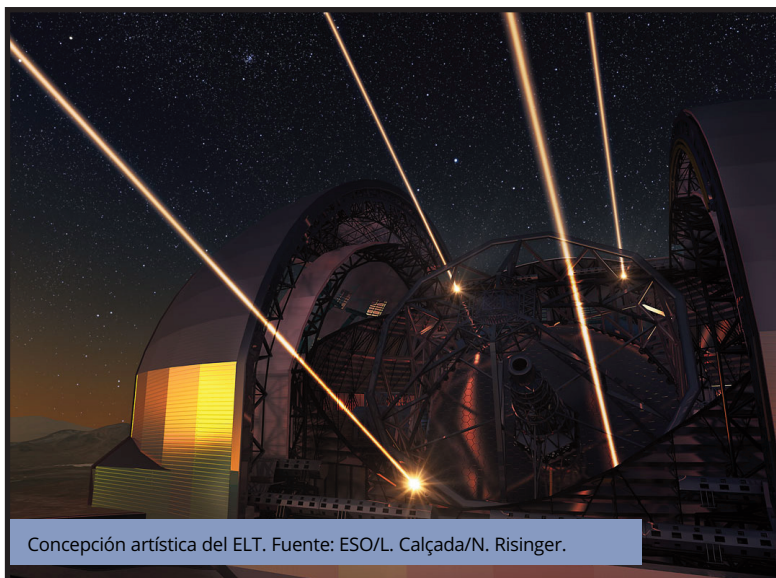
Desde el IAA trabajamos en el diseño del sistema de control de los motores que gestionan los distintos mecanismos que se



encuentran dentro del espectrógrafo del infrarrojo cercano de MOSAIC. Para ello, es necesario diseñar tanto los dispositivos que se encuentran dentro del espectrógrafo como los que se colocan en el exterior. En el interior y debido a la necesidad de trabajar a temperaturas tan bajas, los motores usados deben de tener ciertas características (uso de lubricantes sólidos, alta capacidad de refrigeración, etc) que los hagan aptos para su uso en criogenia. Del mismo modo, los dispositivos encargados de detectar y comunicar al sistema electrónico de control la posición del motor en cada momento deben ser dispositivos analógicos (*resolvers*) en lugar de digitales (*encoders*), puesto que la electrónica no funciona bien a temperaturas tan bajas.

En la actualidad estamos centrados en la electrónica de control que se encuentra fuera del espectrógrafo, específicamente en un primer prototipo aún en desarrollo que utiliza distintos componentes de la marca Beckhoff para el control de un motor con *encoder* a temperatura ambiente.

Ilusionado ante la posibilidad de ver el fruto de mi trabajo instalado en semejante obra de ingeniería, a lo largo de los próximos años espero poder seguir aportando y aprendiendo en el proyecto ELT hasta su conclusión, así como continuar formándome en el IAA.



Concepción artística del ELT. Fuente: ESO/L. Calçada/N. Risinger.

Banafsheh Shahzamanian

ESTUDIO DEL CENTRO DE LA VÍA LÁCTEA

Vengo de la histórica ciudad de Isfahán, en Irán. Recuerdo la fascinación que me producía el cielo nocturno cuando era niña. Viví la experiencia única de observar las estrellas en el vasto cielo despejado, que entonces presentaba menos contaminación lumínica.

Cuando era adolescente mi interés por el universo creció, principalmente a partir de la lectura de libros de divulgación científica. Recuerdo claramente cómo los libros de Stephen Hawking fueron abrumadores para mí y me hicieron pensar en el espacio y el tiempo.

Continué con mi pasión por la física durante mis estudios de licenciatura en la Universidad de Isfahán y luego obtuve mi maestría en astrofísica en Zanja (Irán), donde me familiaricé verdaderamente con la astronomía. Después comencé a impartir cursos de astronomía y cosmología a estudiantes de secundaria y al público en el centro de Astronomía Adib, en Isfahán, donde pude ayudar a los estudiantes a seguir su pasión por la astronomía.

Para continuar mis estudios, solicité y me aceptaron en el programa internacional de doctorado del instituto Max Planck en Bonn y la Universidad de Colonia, en Alemania. Durante mi doctorado en el grupo del Centro Galáctico en Colonia estudié las estrellas de los pársecs centrales y el agujero negro supermasivo central (Sgr A*) de la Vía Láctea. Me introduje por primera vez en el mundo de los datos astronómicos y realicé observaciones con los instrumentos infrarrojos NACO y SINFONI en el *Very Large Telescope* de Chile.

Sgr A* es temporalmente variable en los rangos del infrarrojo cercano (NIR) y rayos X, así como en el dominio de radio a submilimétrico, aunque en menor medida. Comprender la física subyacente que impulsa el mecanismo de emisión de Sgr A* requiere estudiar la polarización de la radiación electromagnética. Usando imágenes en luz polarizada en el infra-

rojo cercano de NACO, pude medir la variación de la intensidad y de las propiedades de polarización de la luz infrarroja emitida por SgrA*. Combinando todos los datos polarimétricos de Sagitario A* de varios años y realizando un análisis estadístico, pudimos entender algunas de las propiedades fundamentales de la geometría del proceso de acreción, o de absorción de material, del agujero negro. También analizamos la naturaleza y propiedades de las fuentes con exceso de emisión en el infrarrojo cercanas a la posición de Sgr A*.

Después del doctorado permanecí en la Universidad de Colonia con un puesto postdoctoral. Durante este tiempo, junto con un estudiante de doctorado, nos concentramos en el estudio de las órbitas relativistas de las estrellas en el campo gravitacional cerca de Sgr A*.

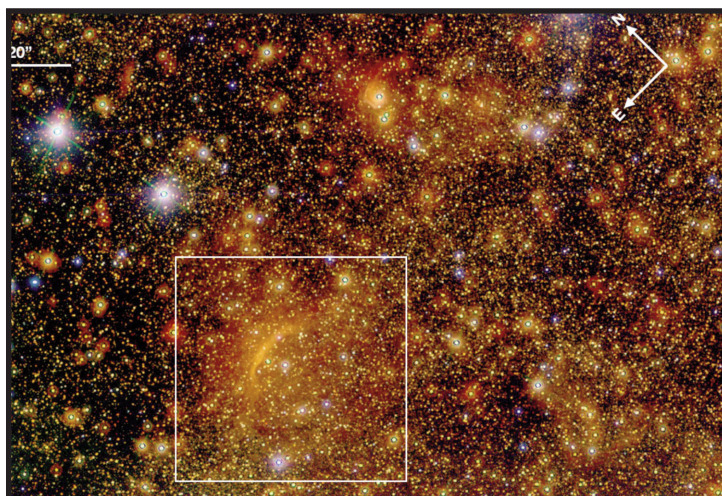
Luego me trasladé al IAA-CSIC para trabajar en el grupo del Centro Galáctico financiado a través de una beca del Consejo Europeo de Investigación, como investigadora postdoctoral. Mi proyecto trata sobre la formación de estrellas en el Centro Galáctico (GC), con el objetivo de lograr un gran avance mediante la búsqueda de cúmulos jóvenes en el GC a través de medidas de movimientos propios. Actualmente, esta es la única posibilidad realista de encontrar cúmulos estelares en esta región. Se espera la presencia de cúmulos numerosos, pero escapan fácilmente a la detección posiblemente porque las fuerzas de marea en esta



región diluyen los cúmulos de forma rápida, de modo que no pueden ser detectados entre el denso fondo de estrellas del Centro Galáctico.

Combinando dos sondeos de alta resolución angular, Paschen- α del Telescopio Espacial Hubble y GALACTICNUCLEUS, coordinado por el grupo del Centro Galáctico del IAA, iniciamos un estudio de movimiento propio a gran escala de la región central de la Vía Láctea. Demostramos la viabilidad de nuestro enfoque al descubrir un primer grupo de estrellas que se mueven conjuntamente en el Centro Galáctico.

La cinemática general de las poblaciones estelares en el Centro Galáctico se puede estudiar utilizando movimientos propios. Durante mi proyecto como contratada postdoctoral Severo Ochoa, estamos trabajando en producir un catálogo de movimientos propios estelares para una gran parte del GC, un área que no ha sido suficientemente cubierta por otros estudios astronómicos disponibles. También hemos desarrollado la metodología necesaria para utilizar los movimientos propios para detectar grupos de estrellas que se mueven conjuntamente y que trazan cúmulos jóvenes disueltos en el GC. El análisis de estos cúmulos disueltos nos ayudará a delimitar la tasa de formación de estrellas en el Centro Galáctico en los últimos diez millones de años.



Región del Centro Galáctico observada por el proyecto GALACTICNUCLEUS (Shahzamanian, B. et al, 2019)

Guang-Yao Zhao

AGUJEROS NEGROS SUPERMASIVOS CON EL EHT

Los agujeros negros son los objetos más fascinantes del universo. Cuando era estudiante de secundaria, leí sobre ellos y me atraieron profundamente. También aprendí sobre los objetos conocidos como núcleos activos de galaxias (AGN), que funcionan con agujeros negros supermasivos (SMBH) con millones de masas solares y que viven en el centro de la mayoría de las galaxias. Comencé a hacer observaciones científicas de ANG en longitudes de onda ópticas para mi tesis de licenciatura. Al mismo tiempo, me di cuenta del poder de las observaciones en longitudes de onda fuera del rango visible, especialmente en longitudes de onda de radio, mucho más largas que la luz visible, donde es posible la técnica llamada interferometría de muy larga base (VLBI). Esta técnica permite que radiotelescopios separados geográficamente trabajen juntos para formar un telescopio virtual con el tamaño equivalente a la separación entre los telescopios, y proporciona la resolución angular más alta en astronomía. Realicé observaciones VLBI en longitudes de onda de centímetros de varios AGN con alta emisión en radio para mi doctorado.

La resolución de una matriz VLBI depende de su longitud de onda de observación y la longitud de las líneas de base (la distancia entre diferentes elementos). Para lograr una resolución más alta, necesitamos observar a longitudes de onda más cortas o extender la longitud de la línea de base. El instituto donde realicé mi primera investigación postdoctoral, el Instituto de Astronomía y Ciencias Espaciales de Corea (KASI), opera una red VLBI de tres elementos. Esta red es la primera red VLBI dedicada en longitudes de onda milimétricas en el este de Asia. En comparación con la VLBI en longitudes de onda de centímetros, que está bien establecida, la versión milimétrica de la VLBI enfrenta muchos desafíos. Estos desafíos provienen del hecho de que los instrumentos suelen ser menos sensibles en milímetros y a que la atmósfera se vuelve más tur-

bulenta, lo que limita el tiempo que podemos integrar los datos para obtener relaciones señal/ruido más altas. La característica más singular de la red coreana VLBI (KVN) es que puede observar en cuatro longitudes de onda diferentes (incluidas una banda centimétrica y tres bandas milimétricas) al mismo tiempo. Se ha demostrado que este modo de observación es ideal para superar esos desafíos para la VLBI milimétrica. Durante mi estancia en Corea estudié la fuente de radio asociada con el agujero negro supermasivo en el centro de nuestra Vía Láctea, Sgr A*. También desarrollé aún más el método relevante para el análisis de datos VLBI en longitud de onda múltiple.

La limitación de KVN proviene de las longitudes cortas de la línea de base (solo unos 500 kilómetros). Para lograr la resolución que será suficiente para resolver un agujero negro, necesitamos una matriz VLBI global que opere la longitud de onda más corta posible para VLBI, un milímetro. El Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT) es un proyecto de este tipo. La matriz EHT actual consta de nueve telescopios/matrices ubicados en siete enclaves diferentes, incluido uno en el pico Veleta en Granada, España. El objetivo científico principal de la colaboración EHT es tomar imágenes del



horizonte de sucesos de los agujeros negros supermasivos y realizar pruebas de la teoría de la relatividad de Einstein.

Me convertí en miembro de la colaboración EHT en 2017 y participé en la calibración y la obtención de imágenes de los datos de observación tomados ese año. En abril de 2019 publicamos la primera imagen de un agujero negro. La imagen muestra un anillo brillante formado cuando la luz se curva debido a la intensa gravedad alrededor del agujero negro de M87, 6500 millones de veces más masivo que el Sol. Esta imagen tan buscada proporciona la evidencia más sólida hasta la fecha de la existencia de agujeros negros supermasivos y abre una nueva ventana al estudio de los agujeros negros, sus horizontes de eventos y la gravedad. El resultado del EHT ha sido ampliamente reconocido por la comunidad científica y el público. La imagen del agujero negro se descargó unos 4500 millones de veces. La colaboración EHT también recibió el premio Breakthrough de Física fundamental 2020.

Me uní al IAA como contratado postdoctoral Severo Ochoa en diciembre de 2019, donde continúo con mi línea de investigación. También trabajo como coordinador del grupo de trabajo de *Scattering* del EHT. Mi enfoque actual son las observaciones EHT del agujero negro en el centro de la Vía Láctea, y mis objetivos futuros también incluyen la introducción del sistema de recepción estilo KVN en los telescopios EHT de próxima generación, especialmente los propuestos en España.

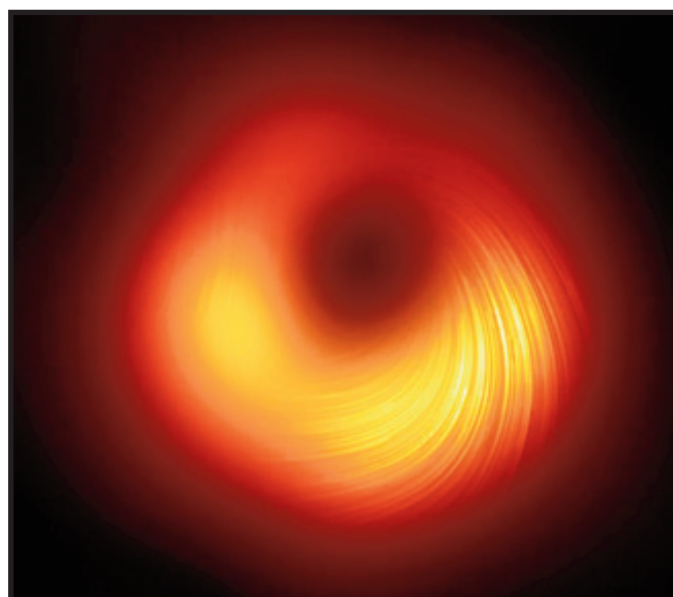


Imagen en luz polarizada del agujero negro central de M87, obtenida por el EHT.

VISITANTES INTERESTELARES

En octubre de 2017, usando el telescopio Pan-STARRS se descubrió un objeto extraño, un tipo de asteroide con una órbita hiperbólica en torno al Sol que luego se llamaría Oumuamua. Al principio lo único curioso parecía ser su órbita, pero veremos que hay muchas más cosas curiosas sobre este objeto

Para presentarlo, comencemos con algunos números para entender el problema: el objeto mide unos cien metros de tamaño y se acerca al Sol a una velocidad de 26.3 kilómetros por segundo (muy rápido, ¡unos 95000 kilómetros por hora!). El objeto tiene una órbita hiperbólica que vemos en la imagen inferior, que hizo que se aproximara a la Tierra sin ser visto, desde la parte superior del plano orbital; después pasó cerca del Sol por la parte inferior del plano orbital de la Tierra y resurgió nuevamente en la parte superior del plano justo antes de ser observado. Es decir, ni nos dimos cuenta de que se aproximaba, y fue descubierto cuando ya se estaba alejando.

LA FORMACIÓN

Pero veamos qué son estos objetos. Comencemos desde el principio, desde la formación de estos cuerpos, de los asteroides y de los objetos transneptunianos, en los primeros millones de años desde el nacimiento del Sistema Solar. Durante esta época, muy temprano en su formación, hubo migración planetaria. Los planetas, los gigantes sobre todo, se movieron en sus órbitas (se acercaron y alejaron del Sol), y en ese proceso mezclaron el material existente en el disco de formación. Una de las consecuencias de este proceso fue el Bombardeo Intenso Tardío. Gran parte del material del exterior del disco protoplanetario, con elementos volátiles como el agua, fue trasladado a la parte interior y colisionó con los planetas terrestres que ya estaban formados.

También hubo mucho material que fue arrojado fuera del Sistema Solar, y ese es el material en el que estamos interesados en este artículo.

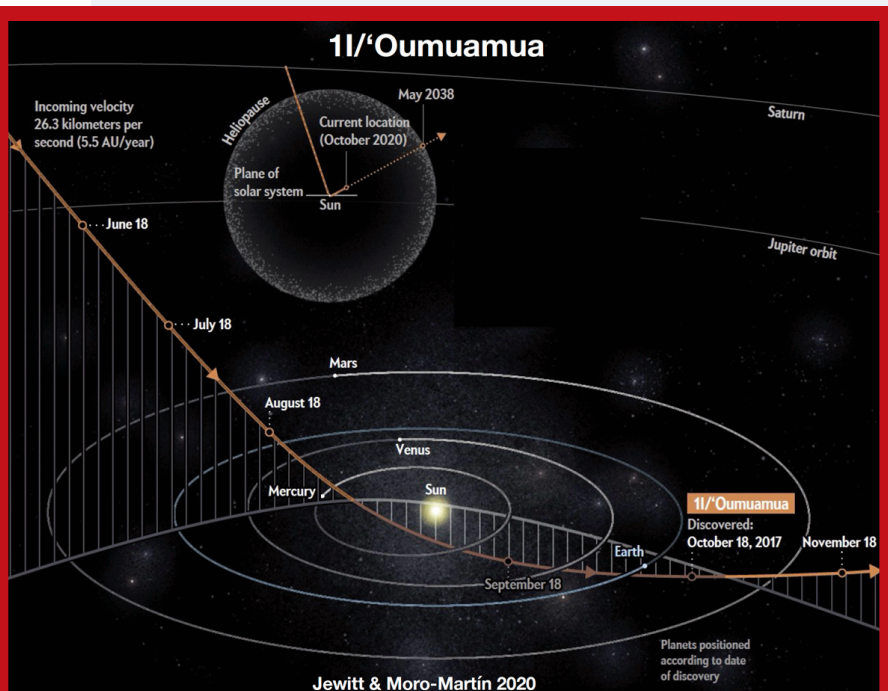
Todo ese material expulsado forma lo que conocemos como nube de Oort, una nube esférica de entre mil y cien mil unidades astronómicas (UA) de radio, con el Sol en el centro. Tenemos que imaginarnos a nuestro Sistema Solar (ver imagen inferior), con el Sol en el centro y los planetas girando en el plano del ecuador del Sol. Entre Marte y Júpiter y más allá de Neptuno, pero siempre en ese plano, hay sendas nubes de material que no llegaron a formar un cuerpo mayor o planeta. Estamos hablando del cinturón de asteroides y del cinturón de Kuiper, respectivamente. Finalmente, envolviendo todo esto, una nube esférica de material expulsado, la nube de Oort.

Si en el recorrido del Sol en torno al centro galáctico, este pasara cerca de alguna otra estrella, ese material podría ser expulsado de la nube de Oort. Algo de ese material caería hacia el interior y lo veríamos como cometas y algo de ese material sería expulsado hacia el exterior y sería material perdido. Y ese material o, mejor dicho, ese material pero de otra estrella, es el que guarda relación con Oumuamua.

El escenario sería algo así: se van formando estrellas, alrededor de las que pueden formarse discos protoplanetarios donde, si se dan las condiciones, se forman los planetesimales que podrían acabar formando planetas. Algunos de estos planetesimales, en la primera fase de formación del sistema planetario, son expulsados.

Imaginemos que, al formar un sistema planetario, parte del material se pierde en el proceso y queda vagando en el espacio interestelar.

Es como si fuéramos construyendo una casa, nuestro Sistema Solar y, por la propia forma de construir, algo del material, unos ladrillos, alguna teja o un trozo de madera, se nos escapara y “contaminara” el barrio. Resulta que ese trozo de ladrillo o teja, al tiempo, es encontrado en otra construcción, de otra casa, y podría ser usado o no. Si ya tengo mi sistema planetario formado, el objeto podría interactuar con los cuerpos del sistema. Quizás se adhiere a la nueva construcción y nadie se da cuenta de que venía de otra casa, de otro sistema. A nosotros nos



Órbita de aproximación de 1I/Oumuamua, acercándose por encima del plano orbital y pasando a la parte inferior del plano cerca de la órbita de Mercurio. Justo antes de pasar nuevamente a la parte superior del plano, en octubre de 2017, fue descubierto. En el esquema interior se puede ver la órbita de Oumuamua en una escala más pequeña para resaltar lo curioso de su trayectoria.

DECONSTRUCCIÓN

RENÉ DUFFARD
INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA (IAA-CSIC)

interesa el caso en el que alguien lo ve, y ese es el caso de Oumuamua y también de Borisov, otro objeto interestelar del que hablaremos más adelante.

PARTÍCULAS VIAJERAS

¿Cómo sabemos que ese trozo de madera, ladrillo, o teja, es de otra construcción y no de la nuestra? La primera pista la tenemos en su órbita, podemos calcularla y concluir que no hay forma de que haya sido generado en nuestro sistema, haya sido expulsado y luego haya vuelto, como un cometa de largo periodo. Ese es el caso de Oumuamua. También podríamos analizar su composición y comprobar si muestra diferencias significativas. Eso no lo pudimos hacer con Oumuamua, pero sí lo podemos hacer con las partículas de polvo interestelar (ojo, no confundir con las IDP, o partículas de polvo interplanetario).

Esta pista viene de los detectores de polvo de las naves espaciales. Se han analizado los datos de los detectores de polvo en las naves *Ulysses* y *Galileo* y se ha comprobado que hay una corriente de polvo interestelar que atraviesa nuestro Sistema Solar.

Estas partículas serían el equivalente al polvo que me llega de la otra construcción; lo puedo encontrar y analizar, pero no tengo toda la información que me daría un trozo de ladrillo o teja. Pero si ya se se conocían partículas que vienen de fuera del Sistema Solar...¿entonces Oumuamua no sería el primer objeto interestelar! Y así es: sería, sin embargo, el mayor descubierto hasta ese momento.

También hay que mencionar el material "presolar". En algunos meteoritos primitivos se han descubierto pequeños granos de material con abundancias isotópicas completamente diferentes a las encontradas en nuestro Sistema Solar. Se interpreta que estos granos se han formado en torno a otra estrella y luego han sido transportados al nuestro. Es decir, sufrimos la contaminación de polvo de otras estrellas.

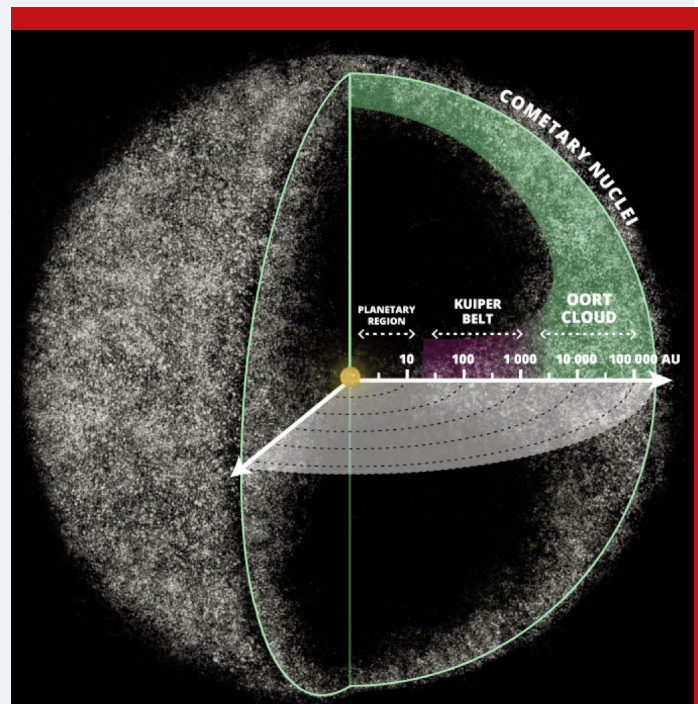
¿Qué pasó con Oumuamua que causó tanto revuelo? No se ponían de acuerdo en su forma ni en su velocidad al salir del Sistema Solar, por mencionar dos incógnitas. Para conocer la forma de un asteroide podemos medir su curva de luz, o cómo varía su brillo en el tiempo a medida que el objeto rota. La curva de luz de Oumuamua representaba un objeto muy alargado, parecida a un cigarro, y cuando se calculaba su densidad media parecía un objeto muy poroso. Con respecto a su órbita, se detectó que la velocidad había sufrido un cambio, una aceleración que no se podía explicar. Y aquí comenzaron las teorías extrañas: se difundió que era una nave espacial, o que había desplegado unas velas supergigantes. La idea de la nave es muy mediática o incluso muy atractiva, pero no es necesaria para explicar las características de este objeto.

El objeto 2I/Borisov es el segundo objeto descubierto de este tipo. En las imágenes de su descubrimiento presenta una coma y cola, por lo que definitivamente es un objeto con hielos, así en plural, en su superficie. Su apariencia es como la de cometa típico, un poco más grande que Oumuamua, de entre doscientos y quinientos metros. Y, claro, como parece

un cometa normal muy poca gente le ha prestado atención. Pero, ¿por qué estamos descubriendo estos objetos ahora, y no antes? En realidad, estamos comenzando a descubrir objetos grandes, de entre cien y quinientos metros, pero ya conocíamos la existencia de partículas de fuera del Sistema Solar desde los años noventa del siglo pasado. Se estima que hay diez mil objetos del tamaño de Oumuamua por ser descubiertos en nuestro Sistema Solar. Con los futuros estudios del cielo, que permitirán fotografiar el cielo completo cada tres o cuatro noches, como lo hará el telescopio Vera Rubin, se espera encontrar muchos más objetos grandes de este tipo. La misión *Comet Interceptor*, ya aprobada por la Agencia Espacial Europea (ESA), podría estudiar de cerca uno de estos objetos. La idea central e innovadora de esta misión reside en que quedará aparcada en un punto lagrangiano de la Tierra, un punto orbital estable, y esperará que un cometa de la nube de Oort o un objeto interestelar se aproxime a la Tierra. Una vez detectado este tipo de objeto, la nave se acercará y lo estudiará como lo han hecho misiones a asteroides y cometas anteriores, como DAWN o Rosetta.

Para concluir, creo que lo que tenemos que aceptar es que nuestro Sistema Solar no es un lugar aislado y presenta "contaminaciones" de otros sistemas. De la misma forma que algunos objetos pueden salir de nuestro Sistema, otros objetos o partículas de otros sistemas planetarios pueden ingresar en él.

Estudiar estos objetos es hacerlo sobre material que fue formado en otro sistema solar. Al final sí que van a ser cápsulas de material congeladas en el tiempo (prefiero evitar la palabra nave espacial) de otro sistema solar.



Esquema representativo de cómo sería nuestro Sistema Solar, y cualquier otro sistema con planetas y una nube equivalente a la de Oort.

La máquina en el desierto

POR SEBASTIANO DE FRANCISCIS
(MURPHY INSTITUTE OF CALAMITY, MIC)
Y EMILIO J. GARCÍA (IAA-CSIC)

Apreciadas amigas, queridos amigos del IAA, me presento, soy Murphy, y soy el duende napolitano del fracaso científico. A lo largo de la historia he tenido muchos nombres: fatalidad, adversidad, infortunio, mala suerte, desventura, desgracia, fracaso... Los griegos me llamaban Ate, los nórdicos, Wynd; los romanos, Nefas. Para los gitanos soy el mal fario o malaventura, y para los napolitanos, la jattura o malaciorta. Pero soy más conocido en el mundo entero con el nombre de Murphy. Ya sabéis, si algo puede salir mal... saldrá mal. Esta es mi misión, esta es mi diversión.

Hoy os hablaré de un gran fracaso científico experimental, debido a políticos, ideales en lucha y partidas presupuestarias... cualquier pretexto, cualquier medio es bueno para lograr mis objetivos.

Estamos en un gran túnel subterráneo, en la semioscuridad, abandonado. Este túnel no lleva a ninguna parte, es circular, o por lo menos debería serlo (en realidad fueron excavados solo 24 de los 90 kilómetros totales, un detalle todavía más inquietante), como los bucles de intentos fallidos de la ciencia experimental, como los pensamientos obsesivo-compulsivos del científico que no puede parar de pensar por qué no le cuadran las cuentas.

El Desertron, “la máquina en el desierto”, (su nombre oficial es *Superconducting Super Collider*, SSC), ubicado en Waxahachie, Texas, iba a ser la máquina más grande construida por el hombre, veinte veces más potente que el acelerador del Fermilab y sesenta veces más que el del CERN: era en 1982. En aquel agosto, Leon Lederman, director del Fermilab, pronunció una apasionada conferencia en Colorado ante los mejores físicos del país: había en el aire una guerra entre América y Europa por ser los primeros en descubrir el bosón de Higgs y la administración Reagan había declarado que haría lo que fuese necesario

para que el logro fuese norteamericano. La primera duda con el Desertron tuvo que ver con su diseño. ¿Debería servir para colisionar protones con protones o protones con antiprotones? Toda la estructura de la instalación dependía de ello. Si querías hacer colisionar dos haces de protones tenías que tener dos anillos con partículas dando vueltas, unas en una dirección y otras en la opuesta, y juntarlas en algún momento para hacerlas chocar. Con un acelerador protón-antiprotón bastaba con un único anillo donde las partículas dieran vueltas, cada una en su dirección, hasta colisionar, subdividirse y crear reacciones. En aquel primer equipo de estudio sobre el diseño de la gran máquina estaba también “un tal” Barry Barish, supervisor de uno de los experimentos diseñados por el SSC, el GEM (Gammas, Electrons, Muons), viviendo la ilusión y el fracaso del Desertron. Eran casi tres mil empleados reunidos en Waxahachie, a 40 kilómetros al sur de Dallas: incluían directores de proyecto,

científicos en nómina, físicos experimentales, más de cuatrocientos ingenieros, por encima de 150 informáticos y expertos en redes, científicos invitados de otros países... Ellos iban a lo suyo, construyendo el acelerador y diseñando los experimentos, dando por hecho que el Supercolisionador vería la luz tarde o temprano.

Su coste estimado se elevó desde los tres mil millones de dólares iniciales hasta más de doce mil millones. La administración USA contaba con que Japón sufragaría parte de los costes, pero cuando el presupuesto comenzó a aumentar... ¡Sayonara, baby! En cualquier caso, el proyecto estaba, sorprendentemente, sobreviviendo a las dos legislaturas republicanas de Reagan y a la de

George H.W. Bush (padre).

Dijo Barry Barish: “Hubo detalles que pudieron hacerse mejor por parte de la dirección del SSC. En fin, un experimento exitoso está hecho de miles de pequeños detalles, como tuerquillas y finos tornillos, obsesivamente limados [...] y hubo detalles ante los que no pudieron hacer nada...”.

Detalles como el cambio repentino de políti-



cas económicas, impulsado por el nuevo escenario de la geopolítica internacional, con algún que otro empujón debido a mí, Murphy, un servidor. También mis obras son minuciosas: es un trabajo duro y sucio escudriñar las posibilidades técnicas, tecnológicas e históricas, de las más pequeñas a las más imponentes, ¡y luego limar una y otra vez un pequeño pretexto para que fracase un gran proyecto!

El SSC tendría que haber echado a andar hace ahora veintidós años, en 1999, y fue finalmente cancelado hace veintiocho, en 1993. La desintegración de la URSS en 1989 le quitó todo el sentido a aquella carrera científica por la física de partículas del futuro. Sin un temible competidor y con

la recesión de principios de los noventa, el proyecto del Supercolisionador fue cancelado. Se habían gastado dos mil millones de dólares y de aquello solo quedó un fantasmagórico complejo de edificios con un túnel donde el agua comenzaba poco a poco a filtrarse.

“En 1994, cuando un nuevo Congreso entró con mayoría republicana dijeron que había que hacer recortes y que fueran visibles”, dice Barish. “Había que terminar o con la Estación Espacial Internacional o con el SSC”. Y por lo visto, la Estación Espacial sigue ahí arriba. Tras cuadruplicar su coste inicial, la recién llegada administración Clinton -y un Congreso de mayoría republicana- cancelaron el SSC sin pensárselo. Veinticuatro kilómetros de túnel parcialmente excavados, los restos de lo que iba a ser el mayor acelerador de partículas del mundo siguen allí, abandonados entre la maleza.

DE TODO FRACASO SE PUEDE SACAR UN GRAN PROVECHO

El *Superconducting Super Collider* (SSC), en plena guerra fría y con enorme competición intercontinental, iba a ser la máquina más grande construida por el hombre.

¿Puede considerarse todo esto un fracaso? Bueno, sin duda los norteamericanos tuvieron que plantearse en un momento dado qué hacer con un montón de imanes superconductores que no podían servir para ningún otro experimento del mundo excepto el de sus rivales del CERN. Se podrían aprovechar de esta inestimable tecnología puntera las bandas de chatarreros gitanos cyberpunk del desierto del Texas; pero no, dejando a un lado esta fantasía al estilo Mad Max, en realidad en el túnel se empezó a filtrar el agua y las chatarras tecnológicas siguieron allí, oxidándose.

Sin embargo, había muchas mentes nada oxidadas y en el fulgor de su vida investigadora, deseosa de captar otros grandes misterios del universo. “Por supuesto, cuando el acelerador se canceló ya no había sitio donde ubicar el detector”, dice Barish. “Muchos de mis colegas se fueron al CERN; yo no quería hacer eso así que me quedé en el *California Institute of Technology* (Caltech)”.

Cuando el sueño del Desertron murió, en

octubre de 1993, Barish se negó a unirse a

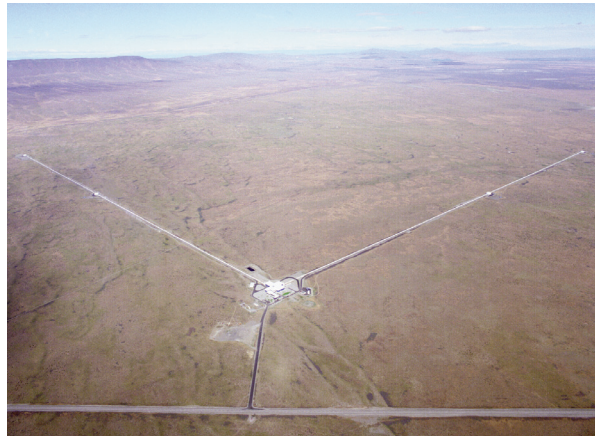


Imagen aérea del observatorio LIGO.

sus compañeros en la búsqueda del Higgs en Suiza. Él tenía la mente en otro proyecto que comenzó tres meses más tarde, en enero de 1994. La construcción de un Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (acrónimo de LIGO) era en aquel momento una absoluta quimera. Quizá no tanto la construcción, pero sí la certeza de que fuese a servir para algo. Fundado el 1984 por Kip Thorne y Rainer Weiss, LIGO fue un proyecto de la colaboración del Caltech y del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), al que se adhirió posteriormente Barish, antes de la propia construcción del interferómetro, empezada en 2002.

¿Qué diría el físico Albert Abraham Michaelson, otro blanco de mi sabotaje científico, que en 1887 ideó un interferómetro parecido para medir la velocidad de la luz? Hasta podría reclamar derechos de autoría sobre el diseño experimental de LIGO.

Cuántos años de sufrimiento y frustración les causé al pobre Barish y a unos cuantos colaboradores suyos... Pero escuchadme, no lo hice por pura maldad: al fin al cabo sigo siendo un servidor de la ciencia y obro no solo para mi diversión, sino también para su bien.

“LIGO era más romántico y un sueño”, recuerda. “Esa combinación, el potencial científico era fantástico, las técnicas eran un reto muy interesante, los colegas con los que trabajaba... no fue una decisión

difícil, sencillamente no quería irme a Europa”. Pero aquel sueño tenía que construirse con algo, y ahí es donde el fracaso del Supercolisionador entra en juego: “Lo que heredé del SSC no fue equipamiento, apenas un puñado de sillas, pero sobre todo personal humano que resultó ser fantásticamente talentoso y que de repente estaba disponible; todos contribuyeron muchísimo a lo que hicimos en LIGO”, dice Barish. “Contraté a cuarenta o cincuenta personas los primeros seis meses y aproximadamente la mitad venían del SSC: el equipo de sistemas de control, el director del proyecto... sí, fui beneficiario del colapso del Supercolisionador. Si hubiera

salido adelante yo nunca habría hecho LIGO, es verdad”. Cuando, entre 2015 y 2016, se hizo pública la primera detección de ondas gravitacionales, todo cobró sentido. Barry Barish, actual director del LIGO, llegó finalmente al premio Nobel de Física en 2017, junto con los compañeros Thorne y Weiss, por descubrir las ondas gravitacionales.

¿Y el sueño del bosón de Higgs, que tanto calentó la cabeza a él y a todos físicos de partículas de su generación? Pues este descubrimiento se lo llevó en el 2012 el CERN en Europa, con el acelerador LHC (*Large Hadron Collider*). El LHC resultó finalmente ser una máquina más eficaz, desde el punto de vista experimental, logístico y energético. Para el Desertron planificaron una luminosidad –es decir, número de partículas por unidad de superficie y por unidad de tiempo en un haz de partículas–, diez veces más pequeña que la obtenida por el LHC. Además, para el LHC no tuvieron que armar grandes obras de ingeniería civil, ya que el túnel/cueva donde se montó preexistía, en cuanto albergaba un experimento antecedente, el LEP. Finalmente, en el SSC la energía de colisión tenía que ascender a 40 TeV, más de tres veces la del LHC, de tan solo 13 TeV.

¿Cuánto ha de trabajar el duende y señor de la fatalidad para mantener los precarios equilibrios geopolíticos y medioambientales de nuestro planeta! Y a pesar de esto recibo maldiciones sobre maldiciones. Qué ingrata tarea la mía... Es un sucio trabajo, pero alguien tiene que hacerlo.

EL MOBY DICK DE...

...ANTONIO CLARET (IAA-CSIC)

LOS NÚCLEOS DE LAS ESTRELLAS



Investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), estudia varios aspectos teóricos de la física estelar. También se dedica, en su tiempo libre, a la historia de la astronomía durante el medievo español así como a algunas cuestiones de paleontología, en particular las velocidades de los dinosaurios terópodos.

Cuando empecé mi tesis en el IAA, bajo la dirección de Álvaro Giménez, me encontré con una especie de Orthros, el perro mitológico con dos cabezas: Álvaro, un observador de primera línea; y yo, un principiante con los ojos puestos más dentro que fuera de las estrellas. Pero tal diferencia de intereses, creo, acabó por funcionar. También me viene el recuerdo de las interminables conversaciones con nuestro compañero Antonio Delgado sobre evolución estelar. Tales intercambios de ideas se volvieron más frecuentes y fructíferos cuando me trasladé a un despacho contigo al suyo.

Lo que me preocupaba en la época, además del trabajo de tesis en sí, eran las dimensiones de los núcleos convectivos donde tenían lugar las reacciones termonucleares en estrellas donde predomina el ciclo CNO (estrellas con masas mayores que aproximadamente 1.3 masas solares). Pero, ¿cuál es la importancia de estas dimensiones? El tamaño del núcleo de las estrellas de esta clase dictamina cuánto combustible está disponible y, por lo tanto, cómo evolucionarán y cuánto durarán sus vidas. En este tipo de estrellas la energía es transportada por células convectivas, proceso similar al burbujeo del agua hirviendo en un cazo. Tradicionalmente se ha recurrido a una estimación del tamaño del núcleo mediante un criterio (Schwarzschild) que se basa en la aceleración de las mismas: cuando esta es nula, el movimiento cesa, lo que pone un límite al tamaño del núcleo.

Sin embargo, por inercia, dichas células todavía pueden recorrer un camino mayor que el dictado por dicho criterio, resultando en un núcleo mayor (rebosamiento del núcleo, del inglés *core overshooting*). Como consecuencia habrá más combustible disponible, lo que alarga la vida de las estrellas, entre otros detalles. Eso obviamente tiene repercusiones en diversos campos de la evolución estelar y galáctica, como por ejemplo el estudio de poblacio-

nes estelares y la formación de objetos compactos como las enanas blancas, estrellas de neutrones o agujeros negros, productos del agotamiento del combustible en los núcleos estelares.

UN OBJETIVO ESCURRIDIZO

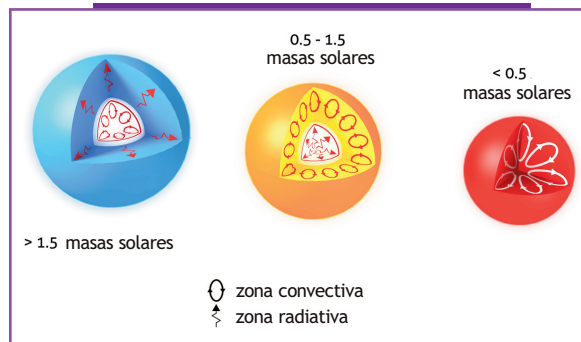
Tenía la intuición de que tales dimensiones dependían de la masa estelar, pero no tenía cómo demostrarlo y, por si fuera poco, ahora manejaba una incógnita más: el reboseamiento del núcleo. Terminada la tesis, me dediqué a asuntos distintos: modelos de evolución estelar, oscurecimiento por gravedad y del limbo, movimiento apsidal newtoniano y relativístico, binarias eclipsantes,

centrándome, por ejemplo, en el teorema de von Zeipel, que describe cómo es la distribución de temperaturas en una estrella distorsionada por la rotación y/o por fuerza de marea. Como resultado, se demostró que dicho teorema solo es válido en ciertas condiciones y que no funciona para la mayoría de los casos. Por otra parte, la interferometría óptica ha demostrado que, para estrellas que rotan con velocidades cercanas a la de ruptura, dicho teorema tampoco es válido.

Hace más o menos unos cinco años, un colega del CFA, Guillermo Torres, quien es un eximio espectroscopista, me preguntó si no iba a retomar mi ardua lucha con los tamaños de los núcleos convectivos. Me comunicó que él, durante más de una década, había compilado una muy buena y extensa fuente de datos observacionales que cumplían los requisitos mencionados anteriormente. De esta simbiosis, y con los datos observacionales y modelos de evolución estelar, conseguimos determinar en una serie de cuatro artículos de forma mucho más clara y precisa tal dependencia. Hemos encontrado un aumento muy significativo del reboseamiento del núcleo en las estrellas con masas entre 1.3 y 2.0 masas solares, seguido de un cambio mucho más suave para estrellas más masivas (hasta 4.4 masas solares aproximadamente, que era el límite superior de nuestra muestra).

Particularmente, estos trabajos me han traído cierta satisfacción, porque en el apéndice del artículo del año 2017 demostramos analíticamente que tal dependencia debería existir, además de ser coherente con los datos observacionales.

Actualmente nos centramos en estrellas todavía más masivas que, por su rápida evolución, estadísticamente constituyen un objetivo más difícil para configurar una muestra adecuada. Mi Moby Dick acecha de nuevo... y de esta vez tengo la ligera sensación de estar navegando con una pierna fuera del barco.



Estructura interna de las estrellas dependiendo de su masa.

santes, etc. Mi Moby Dick se escondía... En 2007 publiqué un artículo donde intentaba demostrar la relación entre masa y tamaño del núcleo. La única fuente fiable (además del Sol) de masas, radios y temperaturas efectivas para tal estudio son las binarias eclipsantes de doble línea. Estas deberían estar evolucionadas lo suficiente para poder utilizarlas en mi investigación. En este punto, apareció un arrecife: en aquella época había pocos sistemas disponibles que cumplían los requisitos y fue un primer aviso. No fui capaz de determinar con claridad tal dependencia: parecía haber una cierta tendencia, pero no de forma evidente. Cambié un poco la dirección de mi investi-

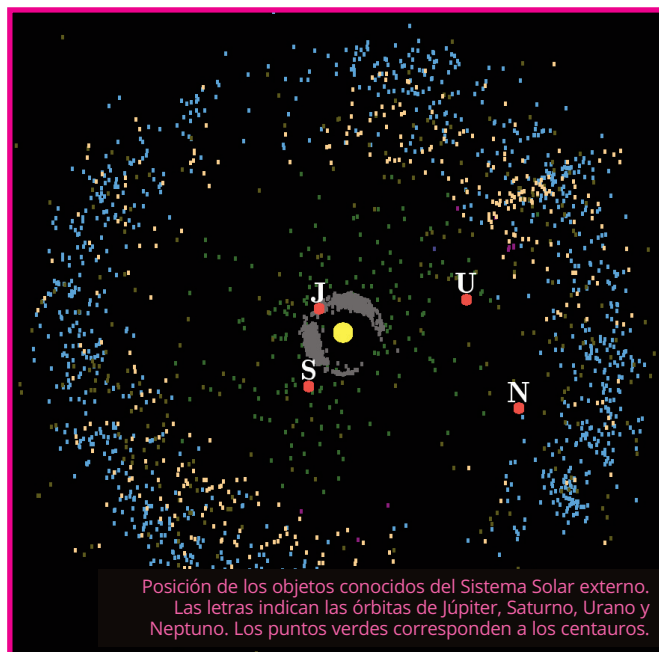
Un vistazo con “lupa” a uno de los mayores centauros conocidos

LOGRAN DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS DE 2002 GZ32, UN CENTAURO DE CASI 400 KILÓMETROS DE DIÁMETRO EN SU EJE MAYOR

En las regiones heladas del Sistema Solar, entre Júpiter y Neptuno, se halla una población de objetos conocidos como centauros, que comparten características tanto con los cometas como con los asteroides. Se trata de objetos helados, pequeños y de bajo brillo, de modo que su estudio resulta extremadamente complejo y nuestro conocimiento sobre ellos es aún escaso. Un estudio internacional liderado por el IAA-CSIC ha permitido determinar las características de 2002 GZ32, uno de los mayores centauros conocidos.

Los investigadores emplearon el método de las ocultaciones estelares, que consiste en la predicción y observación del paso de estos objetos por delante de las estrellas de fondo. Una especie de pequeño eclipse que nos permite determinar, con una precisión comparable a la de una misión espacial, el tamaño, forma, reflectividad superficial e incluso la densidad o la presencia de satélites o anillos alrededor de estos esquivos objetos.

“Resulta complejo predecir cuándo uno de estos objetos va a ocultar una estrella, y observarlo desde un número suficiente de telescopios (un mínimo de tres, y suficientemente alejados entre sí). Esta técnica nos ha permitido realizar hallazgos sorprendentes en el pasado. Por ejemplo, hasta hace apenas unos años solo conocíamos la existencia de anillos alrededor de los planetas gigantes, y nuestro equipo descubrió que los planetas enanos, como Haumea, o los centauros, como Cariclo, pueden tener anillos densos, lo que implica que los anillos pueden ser estructuras más comunes de lo que se pensaba, al menos en las regiones más externas del Sistema Solar”, indica Pablo Santos-Sanz, investigador del IAA-CSIC que encabeza el estudio. Gracias a los datos obtenidos a partir de esta ocultación los investigadores no han podido hallar anillos alrededor de 2002 GZ32, aunque no descartan que puedan existir anillos finos o de material muy transparente, y han averiguado que se trata de un objeto alargado. “Esto nos ha sorprendido. Además, la forma tridimensional que obtenemos no es compatible con que el objeto se halle en equilibrio hidrostático, algo que podría ser mucho más común de lo que pensamos para estos cuerpos del Sistema Solar exterior, como los centauros y los transneptu-



nianos. Esta falta de equilibrio hidrostático hace necesario revisar la definición de planeta enano”, señala Pablo Santos-Sanz (IAA-CSIC).

OBJETOS DESCONOCIDOS

Debido a sus grandes distancias con respecto al Sol los centauros son, junto con los objetos transneptunianos, los cuerpos menos evolucionados y, por lo tanto, más prístinos del Sistema Solar. De los objetos conocidos catalogados como centauros, unos treinta presen-

tan una coma, o una mancha difusa central similar a la de los cometas, y dos de ellos se clasifican tanto como asteroides como cometas.

Los centauros son tan poco conocidos que se desconoce su número (podría oscilar entre varios miles y varios millones de más de un kilómetro de diámetro). Se cree que son los progenitores de los cometas de corto período, que completan su órbita en torno al Sol en menos de doscientos años, como el Halley.

ExoMars descubre un nuevo gas y rastrea la pérdida de agua en Marte

HALLA CLORURO DE HIDRÓGENO EN LA ATMÓSFERA, PRODUCIDA POR LA LIBERACIÓN DE LA SAL INCRUSTADA EN LA SUPERFICIE

Entre los objetivos principales en la exploración de Marte destacan la búsqueda de gases atmosféricos vinculados a la actividad biológica o geológica, así como el desarrollo de un inventario del agua del planeta, tanto en el pasado como en el pre-

sente, para determinar si Marte pudo ser habitable y si algún depósito de agua se halla accesible para exploración humana futura. Dos nuevos resultados del equipo de *ExoMars*, publicados en *Science Advances* y en los que participan investigadores

del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), revelan una clase de química completamente nueva y brindan más información sobre los cambios estacionales y las interacciones entre la superficie y la atmósfera.



UNA NUEVA QUÍMICA

El cloruro de hidrógeno, formado por un átomo de hidrógeno y uno de cloro, forma parte del grupo de gases con base de azufre y cloro a los que los especialistas en Marte prestan especial atención por ser indicadores de la actividad volcánica. Sin embargo, la naturaleza de las observaciones de cloruro de hidrógeno, detectado en lugares muy distantes a la vez y sin la presencia de otros gases asociados a la actividad volcánica, apunta a una fuente distinta. Así, el descubrimiento sugiere

una interacción entre la superficie y la atmósfera completamente nueva, impulsada por las estaciones de polvo en Marte.

En un proceso muy similar al que se observa en la Tierra, las sales en forma de cloruro de sodio, restos de antiguos océanos evaporados e incrustadas en la superficie de Marte, son elevadas a la atmósfera por los vientos. La luz solar calienta la atmósfera y hace que se eleve el polvo, así como el vapor de agua liberado desde los casquetes polares. El polvo salado reacciona con

el agua atmosférica para liberar cloro, que luego reacciona con moléculas que contienen hidrógeno para crear cloruro de hidrógeno. Estaríamos ante un escenario químico donde el agua representa un papel fundamental, y donde parece haber una correlación con el polvo, ya que se observa más cloruro de hidrógeno cuando aumenta la actividad del polvo, que a su vez está relacionado con el calentamiento estacional del hemisferio sur.

AUMENTO DEL VAPOR DE AGUA Y CLIMA MARCIANO

Las evidencias apuntan a que, en el pasado, el agua líquida fluyó a través de la superficie de Marte, como lo demuestran los numerosos antiguos valles y canales de ríos secos. Hoy en día el agua se halla en los casquetes polares y enterrada bajo tierra, y sabemos que el planeta sigue perdiendo agua, que escapa a la atmósfera en forma de vapor.

Comprender la interacción de los posibles depósitos de agua y su comportamiento estacional y a largo plazo

resulta clave para comprender la evolución del clima de Marte. Esto se puede llevar a cabo mediante el estudio del vapor de agua y del agua semipesada, en la que un átomo de hidrógeno se reemplaza por un átomo de deuterio, una forma de hidrógeno con un neutrón adicional.

La proporción entre deuterio e hidrógeno funciona a modo de reloj, ya que nos informa sobre la historia del agua en Marte y sobre cómo evolucionó su pérdida con el tiempo. Y ExoMars-TGO permite observar la trayectoria de los distintos tipos de agua a medida que se elevan en la atmósfera con un detalle sin precedentes, ya que las mediciones anteriores solo aportaban el promedio sobre la profundidad de toda la atmósfera. Los datos de ExoMars recopilados mostraron tres factores que aceleraron la pérdida de agua de la atmósfera: la tormenta de polvo global de 2018, una tormenta regional corta pero intensa en enero de 2019 y la liberación de agua de la capa de hielo del polo sur durante los meses de verano.

Observan por primera vez un chorro de gas mientras emerge de la estrella central de una nebulosa planetaria

GRACIAS AL INSTRUMENTO MEGARA, DEL GTC, INVESTIGADORES DEL IAA-CSIC HAN OBSERVADO Y ANALIZADO EL CHORRO DE NGC 2392

Todas las estrellas con una masa inferior a ocho veces la del Sol terminarán su vida como nebulosas planetarias, formadas por una estrella central —el núcleo “pelado” de la estrella tras la expulsión de sus capas exteriores— rodeada de una envoltura fluorescente. Estas nebulosas pueden presentar formas esféricas, bipolares o de gran complejidad y, aunque toda-

vía se desconoce por qué se desarrolla una forma u otra, los indicios apuntan a la participación de chorros bipolares de material lanzados por la acción de una estrella compañera. Un grupo científico encabezado por el IAA ha conseguido trazar el chorro bipolar de la nebulosa planetaria NGC 2392 hasta su estrella central, demostrando así que el proceso de lanzamiento del chorro sigue aún activo.

Tras agotar su combustible, las estrellas de masa baja e intermedia se desprenden de sus capas externas, que forman una envoltura de gas ionizado en torno a una estrella de tipo enana blanca: una nebulosa planetaria. “Hasta hace solo un par de décadas se creía que las morfologías de las nebulosas planetarias se debían a la

interacción de vientos estelares lanzados en dos fases evolutivas diferentes, un modelo que no explicaba las formas asimétricas o multipolares de algunas de ellas —apunta Martín A. Guerrero, investigador del IAA que encabeza el estudio—. Ahora sabemos que chorros de material, muy veloces y colimados y que se forman al final de la vida de la estrella, podrían interactuar con la envoltura expulsada en etapas anteriores y dibujar distintas morfologías”.

El origen de este cambio de paradigma se remonta a mediados de los años 80, cuando se descubrió lo que se llamó un “flujo bipolar” de alta velocidad precisamente en NGC 2392, la nebulosa objeto de este estudio, y que representaba el primer indicio de un

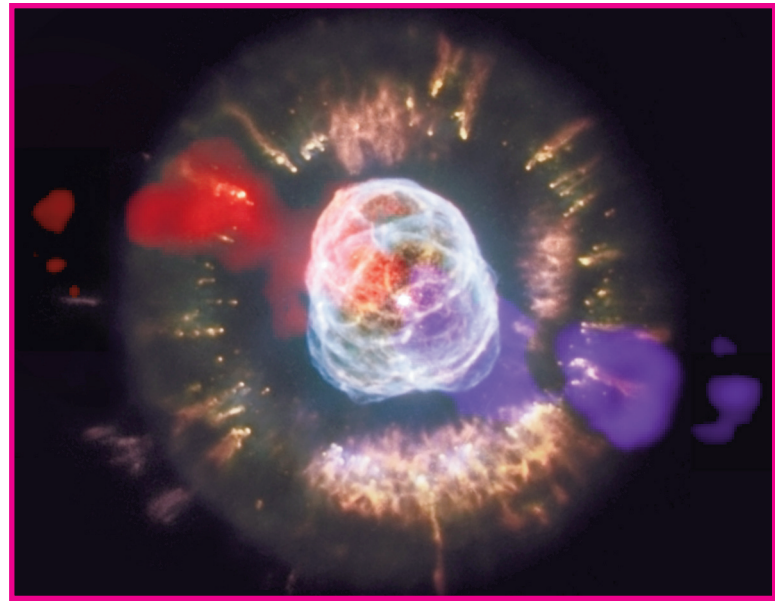
chorro de material en una planetaria. Y, aunque hasta pudo medirse la velocidad del material, el brillo de la nebulosa (especialmente del cascarón interno) impedía obtener una imagen directa del chorro.

Hasta ahora. A día de hoy disponemos de una técnica conocida como espectroscopía de campo integral, capaz de resolver detalles antes inalcanzables y que emplean instrumentos de última generación como MEGARA, que opera en el Gran Telescopio Canarias (GTC). “La extraordinaria capacidad tomográfica de MEGARA nos ha permitido separar la emisión terriblemente débil del chorro de la brillante emisión nebulosa”, apunta Sara Cazzoli, investigadora del IAA que participa en el trabajo.

Así, casi cuatro décadas después del hallazgo del chorro en NGC 2392, los investigadores han descubierto que consiste en dos grandes glóbulos (y algunos nódulos más débiles) que emergen de la estrella central y que se extienden más allá del cascarón externo de la nebulosa. El material del chorro muestra una velocidad de unos 206 kilómetros por segundo, una edad de unos 2600 años y un tamaño lineal que dobla el de la propia nebulosa. Según los resultados, el chorro atraviesa el cascarón brillante interno y, dado que el chorro y el cascarón muestran velocidades similares, todo apunta a que es el chorro quien acelera el gas del cascarón y lo moldea, y

no el débil viento estelar de la estrella. Más aún, la tomografía MEGARA 3D del chorro revela que está siendo colimado en estos momentos, al contrario que los chorros fósiles, ya inactivos, detectados en otras nebulosas planetarias evolucionadas.

“Este trabajo apunala un resultado que obtuvimos en 2019 y que analizaba los rayos X de alta energía que emanan de la estrella central. Estos proporcionan evidencia indirecta de la existencia de una compañera no visible girando en torno a la estrella central. El chorro emergería de la estrella compañera, muy posiblemente otra enana blanca”, concluye Martín A. Guerrero (IAA-CSIC).



Se observan los campos magnéticos en el borde del agujero negro de M87

EL TELESCOPIO DEL HORIZONTE DE SUCESOS ALCANZA UN NUEVO HITO EN LA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA AL ANALIZAR EN LUZ POLARIZADA EL AGUJERO NEGRO SUPERMASIVO DE M87

La colaboración del Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT por sus siglas en inglés), que produjo la primera imagen de un agujero negro, ha revelado una nueva perspectiva del objeto masivo en el centro de la galaxia M87: cómo se ve en luz polarizada. Se trata de la primera vez que se ha podido medir polarización, la “firma” de los campos magnéticos, tan cerca del borde de un agujero negro. Las observaciones son clave para explicar cómo la galaxia M87, ubicada a 55 millones de años luz de distancia, puede lanzar chorros de material muy energéticos desde su núcleo.

“Estamos ante una evidencia única para comprender cómo se comportan los campos magnéticos alrededor de

los agujeros negros, y cómo la actividad en esta región tan compacta del espacio puede impulsar poderosos chorros que se extienden mucho más allá de la galaxia”, apunta Monika Mościbrodzka, coordinadora del grupo de trabajo de polarimetría del EHT y profesora asistente en la Universidad de Radboud (Países Bajos).

El 10 de abril de 2019 se publicó la primera imagen de un agujero negro, que revelaba una estructura brillante en forma de anillo con una región central oscura: la sombra del agujero negro. Desde entonces, la colaboración EHT ha profundizado en los datos sobre el objeto supermasivo en el corazón de la galaxia M87 recopilados en 2017 y ha descubierto que una fracción significativa de la luz alrededor del agujero negro M87 está polarizada.

“Este trabajo es un hito: la polarización de la luz transporta información que nos permite comprender la física detrás de la imagen que vimos en abril de 2019, algo que antes no era posible –explica Iván Martí-Vidal, también coordinador del grupo de trabajo de polarimetría del EHT e investigador de la Universidad de Valencia–. Revelar esta nueva imagen en luz polarizada ha requerido años de trabajo debido a



Imagen del agujero negro supermasivo en M87 en luz polarizada. Fuente: Colaboración EHT.

las complejas técnicas involucradas en la obtención y análisis de los datos”.

“Parte del material circundante que no cae al agujero negro es arrastrado por el campo magnético dando lugar a los poderosos chorros que observamos en los núcleos activos de galaxias, como M87, algo que no habíamos podido observar hasta ahora”, señala José Luis Gómez, coordinador del grupo de trabajo de cartografiado del EHT y líder

del grupo del EHT en el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), del que forman parte también los investigadores Rocco Lico, Guang-Yao Zhao, Antonio Fuentes, y Antxon Alberdi. “Múltiples técnicas de análisis de los datos del EHT se han usado para corroborar estos resultados que nos permiten restringir la física que produce y alimenta estos objetos extremos”, añade Rocco Lico (IAA-CSIC).

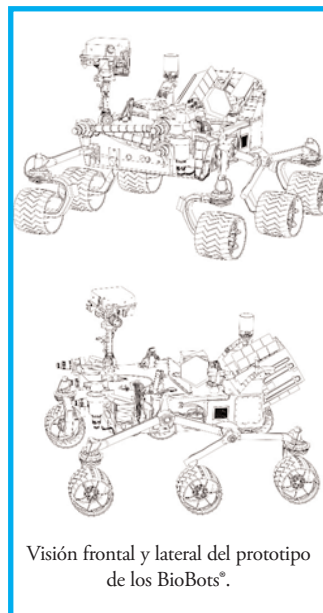
Drug Discovery beyond frontiers

La misión *Drug Discovery beyond frontiers* está diseñada para intentar resolver las diez principales enfermedades que aquejan a nuestra especie. A lo largo de los próximos años se crearán los comités y se diseñarán los BioBots® para la misión. El objetivo es peinar el Sistema Solar con el objetivo de encontrar aquellas moléculas que interfieran de forma eficaz con los procesos de enfermedad.

La primera pregunta que nos hacemos es qué enfermedades serán escogidas para esta investigación interplanetaria. Tres son los principales requisitos de partida para su elección: deben tener una incidencia de más de veinte afectados por cada mil habitantes, debe haber sido identificada la diana molecular que la causa (o que al menos la comunidad científica presente un amplio consenso sobre la misma), y deben de haber sido investigadas sin éxito en la Tierra al menos durante cincuenta años. Se espera que las comisiones de selección de las patologías estén conformadas por representantes de los grupos de interés correspondientes, por lo que sin duda se incluirán científicos de grandes farmas, miembros de los diferentes comités de las agencias reguladoras más importantes, comisionados de la Organización Mundial de la Salud, líderes de opinión del ámbito sanitario, investigadores especializados en cada patología... y astrónomos.

La misión ha sido diseñada para que los BioBots® viajen a diferentes cuerpos del Sistema Solar. Las misiones alcanzarán la Luna, Venus, Ceres, Marte, Europa, Encélado y Titán, e irán reportando la información de forma progresiva, tan pronto como los BioBots® alcancen sus superficies, realicen sus experimentos y envíen los datos a la Tierra.

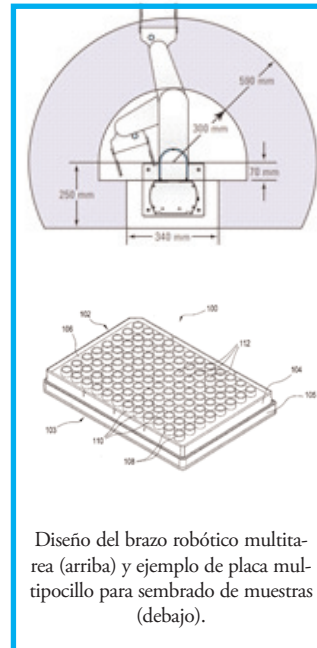
Se ha convenido que el diseño de los BioBots® sea el mismo para todos los destinos. Se trata de unos rovers de aspecto similar al *Perseverance* o al *Opportunity*, pero con un verdadero laboratorio biotecnológico en su interior. Aunque en esta primera fase de la misión se ha decidido construir ingenios terrestres, ya se está pensando realizar una segunda y tercera fase de exploradores submarinos y aéreos.



Visión frontal y lateral del prototipo de los BioBots®.

Hasta ahora tan sólo han trascendido los principales instrumentos de los que dispondrán los BioBots®. Serán los siguientes:

- Brazo robótico para toma de muestras: implementando la tecnología previamente desarrollada para los rovers marcianos, se ha diseñado un sistema de toma de muestras consistente en un sistema multi-instrumento que es capaz de tomar una pequeña muestra e introducirla en recipientes de plástico (placas multipocillo) para su posterior procesamiento y análisis microbiológico y farmacológico.



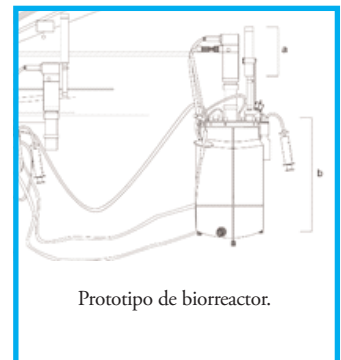
Diseño del brazo robótico multitarea (arriba) y ejemplo de placa multipocillo para sembrado de muestras (debajo).

- Robot de *liquid handling*: las placas multipocillo serán alimentadas con una batería de medios de cultivo estándar preparados previamente. Cada muestra se sembrará en diez medios que han sido prediseñados considerando las diferentes condiciones de cada uno de los ambientes extraterrestres, donde se espera que crezcan microorganismos extremófilos de diferentes tipologías. Una vez sembradas las diferentes muestras en las placas multipocillo, estas se incubarán durante varios días, registrándose la turbiedad mediante un espectrofotómetro de tiempo real.



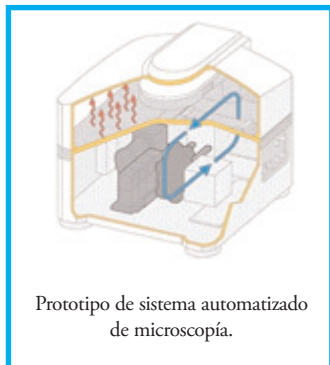
Representación teórica de un microorganismo extraterrestre.

- Batería de biorreactores industriales: Las muestras de aquellos pocillos que aumenten su turbiedad serán transferidas a los biorreactores de seguimiento, monitorizando las curvas de crecimiento hasta alcanzar la saturación de los cultivos, y regulando el flujo de gases (oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono...), la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y la velocidad de agitación, al menos. Una de las características novedosas de estos sistemas es que se han diseñado para la autolimpieza y esterilización, ya que es previsible que tengan que realizar repetidos experimentos de expansión y crecimiento de microorganismos.



Prototipo de biorreactor.

- Plataforma de microscopía automatizada: Mediante el uso del brazo robótico multitarea se montarán distintas preparaciones de las diferentes etapas del escalado de las muestras, tomando imágenes que serán enviadas a la Tierra para su valoración por los microbiólogos especializados en taxonomía de microorganismos, los cuales han alcanzado un protagonismo inusitado tras el diseño de la presente misión, solo comparable al que adquirieron los epidemiólogos durante la época de la pandemia coronavérica.



Prototipo de sistema automatizado de microscopía.

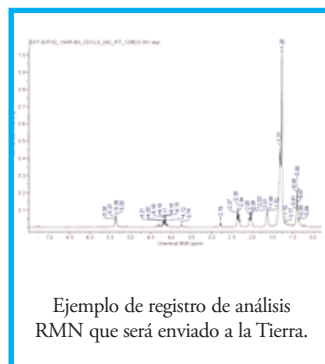
- Sistema de extracción: Alcanzado el estado de saturación del cultivo, se tomará una muestra que será transferida a un sistema de extracción consistente en incubación secuencial en tampones de lisis, realizando variaciones de temperaturas, y mediante la aplicación de ultrasonidos y procesos de agitación mecánica, seguidos de centrifugación. Los sobrenadantes de las muestras centrifugadas serán recogidos por el sistema de *liquid handling* para posteriormente realizar los estudios de *Drug Discovery*.



Prototipo de sistema de extracción acoplado al robot de *Drug Discovery*.

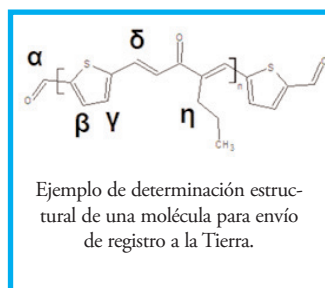
- Robot de *Drug Discovery*: Este sistema utilizará de nuevo el brazo robótico multitarea para el análisis de placas precargadas con las dianas moleculares para cada enfermedad, cuyos experimentos serán revelados mediante sistemas de detección, preferiblemente de marca radiactiva. Aquellos que resulten positivos serán seleccionados para realizar los procesos de fraccionamiento, separación y posterior purificación de picos de

los cromatogramas que servirán de base para los experimentos de elucidación estructural mediante el sistema de RMN.



Ejemplo de registro de análisis RMN que será enviado a la Tierra.

- Equipo de RMN: Las estructuras de las moléculas de las muestras positivas serán elucidadas mediante determinación de RMN y comparación con bases de datos de moléculas conocidas albergadas en las memorias de los BioBot®, que podrán ser actualizadas en remoto con nuevas estructuras moleculares provenientes de la Tierra o del resto de misiones. Por su parte, las estructuras identificadas serán enviadas a la Tierra telemáticamente para ser sintetizadas por los investigadores químicos.



Ejemplo de determinación estructural de una molécula para envío de registro a la Tierra.

- Sistema de ultracongelación: Aquellas muestras que arrojen un resultado positivo para un determinado modelo de enfermedad serán recogidas en reservorios que serán herméticamente sellados y almacenados para ser recogidos en futuras misiones, con el objetivo de traerlos a la Tierra y generar factorías biotecnológicas especializadas en la producción de compuestos extraterrestres. Los sistemas

de ultracongelación serán más o menos críticos en función de las temperaturas medias de cada uno de los cuerpos celestes donde se desarrollan las misiones.

Hasta aquí se describe, muy brevemente, el sustrato del proyecto *Drug Discovery beyond frontiers*, el cual ampliará el conocimiento de las posibles especies extremófilas que puede que habiten en nuestro Sistema Solar, y de las moléculas que han desarrollado estas a lo largo de los procesos evolutivos extraterrestres en los últimos miles de millones de años, de forma análoga a la adaptación que han sufrido los microorganismos de los ambientes extremos de nuestro planeta, y cuyos hábitats son comparables con los de los mundos a explorar. De hecho, en la Tierra hemos sido capaces de encontrar e identificar microorganismos marinos que viven a 11000 metros de profundidad, en los lechos oceánicos profundos de la fosa de las Marianas (como las bacterias del género *Thermaerobacter*), o en condiciones osmóticas extremas en las salinas de Santa Pola (como la *Salinibacter ruber*), o por debajo del punto de congelación del agua en el océano Ártico (como la *Psychromonas ingrahamii*), o a pH casi cero (la *Cyanidium caldarium*), o a 2.700 metros bajo la superficie del suelo (donde fue aislado el

Bacillus infernus), o en condiciones de alta radiación (caso del *Thermococcus gammatolerans* que es capaz de soportar radiaciones de rayos gamma de 30 KGy), por poner algunos ejemplos.

Este proyecto, además, se considera ya entre la comunidad científica internacional como un ejemplo paradigmático de coordinación de nuestra especie en la búsqueda de soluciones a las enfermedades más devastadoras que nos arrasan y para las cuales hemos decidido buscar solución más allá de nuestras fronteras planetarias.

Para conocer más detalles de los procesos de diseño y descubrimiento de fármacos en los que se basa esta misión, pero sin renunciar a la definición de estrategias variadas en el campo de la farmacología, se recomienda la lectura y análisis del libro *Diseñando fármacos*, publicado este mismo año en la editorial Next Door Publishers.

ADVERTENCIA: Los robots y los hechos descritos en este artículo son completamente ficticios. Cualquier parecido con robots verdaderos, vivos o muertos, o con hechos o proyectos reales es pura coincidencia. Eso sí, el autor no se resigna a dejar de cobrar royalties si en algún momento esta misión, u otra desarrollada a partir de esta idea, llegara a materializarse.



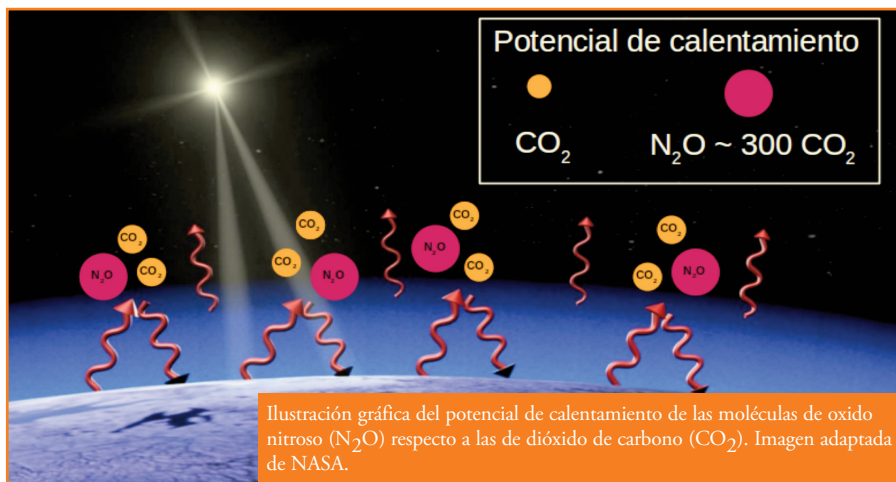
¿Electricidad atmosférica y clima?

PILARES

Sabemos que la química de la atmósfera terrestre es compleja y que ha ido cambiando a lo largo de la historia de nuestro planeta. Sabemos también que la actividad eléctrica en nuestra atmósfera parece haber surgido en paralelo a la presencia de océanos hace unos 3600 millones de años (unos mil millones de años después de la formación del planeta). Estudios publicados en marzo de 2021 indican que la actividad eléctrica atmosférica y, en particular, la actividad eléctrica “caliente”, como la de

los rayos, podría haber sido una fuente crucial de fósforo prebiótico en forma de fosfuros minerales altamente reactivos que, al hidratarse, dan lugar a moléculas orgánicas como el fosfato de glicerol, fosfocolina y nucleósido, importantes para el surgimiento de las moléculas de la vida (ADN, ARN).

Aparte de sus posibles implicaciones para favorecer la química de la vida en la Tierra, la actividad eléctrica en la atmósfera juega un papel relevante en su composición química. Así, sabemos que los rayos aportan más del 10 % del óxido nítrico (NO) de la alta troposfera, que a su vez contribuye a la formación de ozono (O₃) en la alta troposfera y baja estratosfera. El ozono, además de ser un gas de efecto invernadero, elimina buena parte de la radiación ultravioleta que llega del Sol haciendo posible la vida en la superficie del planeta. Un hecho importante es que, por tratarse de una fuente en altura (entre unos cuatro y doce kilómetros), los rayos son tres veces más eficientes produciendo ozono a través del óxido nítrico que otras fuentes superficiales, como los suelos y la quema de biomasa, que por separado producen cantidades de óxido nítrico similares a las de los rayos. Así, por cada molécula de óxido nítrico producida por los rayos, se producen cien de ozono, mientras que por cada molécula de óxido nítrico



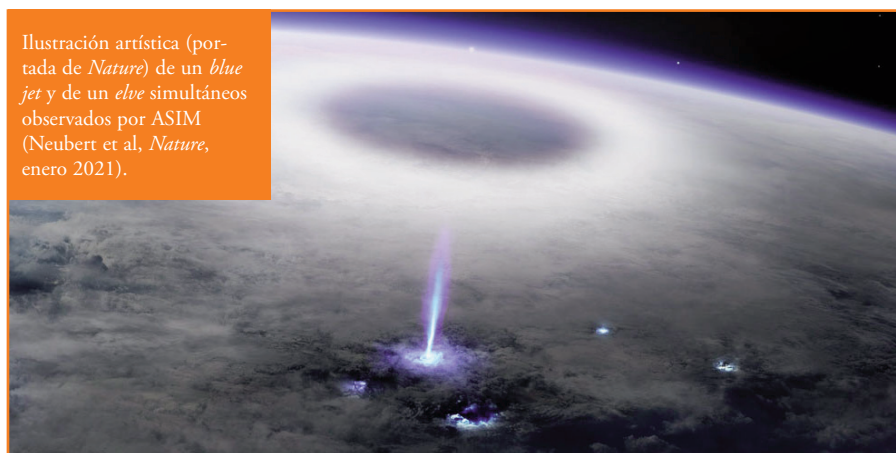
generada por suelos o quema de biomasa solo se producen entre diez y treinta de ozono. Vemos pues que la altura amplifica notablemente el efecto químico de los rayos ya que, entre otras razones, a la altura de los rayos el tiempo de vida del óxido nítrico es sensiblemente mayor que cerca de la superficie (días frente a horas).

Conocer la frecuencia, tipo, intensidad y distribución geográfica de los rayos es muy importante para determinar con precisión su acoplamiento con la dinámica y composición química atmosférica. Sabemos que los rayos son más frecuentes sobre la tierra que sobre el mar, pero más intensos sobre el mar que sobre la tierra. Sin embargo, no ha

sido hasta el año 2003 cuando se ha podido determinar con precisión su frecuencia global, que ha resultado ser de alrededor de cuarenta y cuatro rayos por segundo. ¿Cómo sería el clima de la Tierra sin la presencia de rayos?

Hoy en día la electricidad atmosférica de rayos investiga aspectos como su iniciación en el interior de las nubes de tormenta, su propagación y conexión con estallidos de rayos gamma terrestres y con los fenómenos eléctricos en la mesosfera (*sprites*, *halos*, *elves*) y alta troposfera (*blue jets*), así como la posible alteración de su patrón espaciotemporal debido al rápido calentamiento del planeta.

Ilustración artística (portada de *Nature*) de un *blue jet* y de un *elve* simultáneos observados por ASIM (Neubert et al, *Nature*, enero 2021).



INCERTIDUMBRES

Todavía persisten muchos enigmas en relación con los fenómenos eléctricos en la atmósfera terrestre. Así, la rica actividad eléctrica atmosférica no se reduce a la presencia de rayos y su química “caliente” (decenas de miles de grados) en la atmósfera. Desde principios de los años 1970 se viene especulando con la presencia en la atmósfera de fenómenos eléctricos “fríos” (a temperatura ambiente) vinculados con la posible existencia de descargas eléctricas de tipo corona en las nubes de tormenta. ¿Qué son estas coronas eléctricas? ¿Existen de verdad? ¿Cómo y cuántas son, con qué frecuencia se producen y cuál es su distribución geográfica en la atmósfera terrestre? ¿Podrían ser una nueva fuente natural aún no explorada de gases de efecto invernadero en el seno de la atmósfera?

En 1980 se detectaron misteriosas señales pulsadas muy intensas de radiofrecuencia (RF) que parecían proceder de descargas eléctricas en el interior de las nubes de tormenta. Estos fuertes pulsos de radio se caracterizaban por tres rasgos: por su muy corta duración, de apenas veinte microsegundos; por el aspecto bipolar (muy rápida subida y bajada de dos pulsos de radio de polaridad positiva y negativa o viceversa) de la forma de onda en el rango de bajas (LF) y muy bajas frecuencias (VLF); y por venir habitualmente seguidos de potentísimos estallidos de radiación en el rango de alta (HF) y muy alta frecuencia (VHF). Hoy en día estas señales de radio reciben el nombre de eventos bipolares estrechos o narrow bipolar events (NBE) en inglés que, por lo general, son diez veces más intensos que las emisiones de radio en el rango de alta frecuencia procedentes de rayos intranube o entre nubes.

Observaciones de 2016 y 2017 indicaban que estos potentes pulsos bipolares de radio podrían resultar de procesos muy rápidos de

ionización del aire típicos de descargas eléctricas frías, esto es, aquellas que no calientan el aire circundante (al contrario que los rayos), pero en las que la temperatura de los electrones ambientales alcanza valores muy elevados de hasta ochenta mil grados (unos siete electronvoltios). El hecho de que los electrones tengan una masa muy pequeña (dos mil veces más ligeros que el átomo más liviano) impide que, aun siendo muy energéticos, puedan calentar el aire circundante (solo posible entre colisiones de especies químicas pesadas).

En julio de 2020 el grupo de electricidad atmosférica del Instituto de Astrofísica de Andalucía -miembro del equipo científico de la misión *Atmosphere Space Interaction Monitor* (ASIM, ESA) lanzada en 2018 publicó por primera vez medidas simultáneas de señales de radio (con detectores en el suelo en el rango VLF / LF) y de señales ópticas en el rango ultravioleta (337.0 nm) captadas por ASIM que no venían acompañadas de emisiones infrarrojas (777.4 nm) típicas de rayos. Esto venía a confirmar la presencia de descargas de tipo corona en las nubes de tormenta cuyas análogas a escala se vienen estudiando en el laboratorio de electricidad atmosférica del IAA y que se caracterizan por su color azulado (entre el ultravioleta cercano y el azul), su patrón de ondas de radio, su aspecto filamentoso (dardos de plasma de aire altamente ionizado), y por su enorme capacidad para generar desequilibrio térmico, esto es, para producir una gran diferencia (varias decenas de miles de grados) entre la temperatura del aire y la de los electrones dentro del dardo de plasma de la corona. Por el contrario, los rayos crean ambientes térmicos en el sentido de que la temperatura del aire y la de los electrones son ambas muy altas (decenas de miles de grados) e iguales.

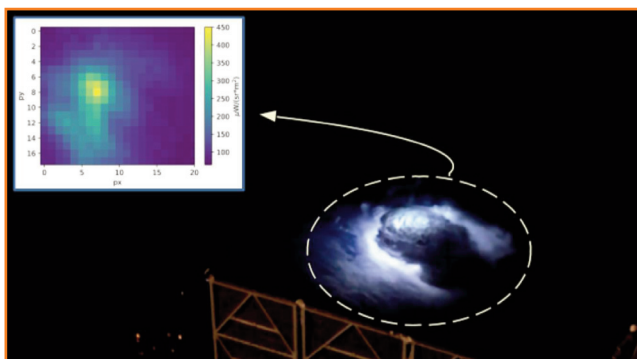
La alta energía de los electrones de los dar-

dos de plasma de las descargas corona les confiere propiedades químicas únicas, esto es, pueden activar muy eficientemente reacciones químicas imposibles de producir en entornos térmicos (rayos) en los que la actividad química está controlada por el choque entre partículas pesadas (átomos y moléculas). Por contra, la química de no equilibrio de las descargas corona abre nuevos caminos químicos (activados por energéticos electrones) que originan especies altamente reactivas que no podrían formarse de otra manera en la atmósfera.

Medidas de laboratorio indican que, mientras las descargas eléctricas térmicas (como los rayos) producen principalmente óxidos de nitrógeno ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$), las descargas corona apenas producen NO_x , pero sí cantidades significativas de óxido nitroso (N_2O) y ozono. El óxido nitroso es el tercer gas de efecto invernadero más importante después del dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4). Sin embargo, el óxido nitroso tiene un potencial de calentamiento global (*Global Warming Potential* en inglés) trescientas veces superior al del CO_2 . Esta propiedad del N_2O hace que la cuantificación precisa de todas sus posibles fuentes y sumideros en la atmósfera sea un asunto crítico de gran relevancia medioambiental, ya que su excesiva presencia en la atmósfera podría dar lugar a un no despreciable aumento del calentamiento global con posibles efectos climáticos.

Quedan muchos interrogantes relativos a las propiedades, procesos de formación, dinámica temporal e influencia química global y quizás climática de las descargas corona en las nubes de tormenta. Por primera vez, gracias a ASIM existe la posibilidad real de poder cuantificar la frecuencia global de las descargas corona en la atmósfera, así como de poder disponer de los primeros mapas globales con su distribución geográfica. Estos trabajos están siendo llevados a cabo en el IAA.

¿Cuáles son las dimensiones típicas de las descargas corona en las nubes? ¿Cuál es su frecuencia de ocurrencia a escala global y su distribución geográfica? ¿Podría su ritmo de producción afectar a la frecuencia e intensidad de los rayos? ¿Podrían tener realmente algún efecto sobre la química atmosférica? ¿De qué tipo? ¿Podrían afectar y verse afectadas por el cambio climático? Son preguntas todas estas que aún no tienen una respuesta en el contexto de las investigaciones que se llevan cabo por la comunidad científica internacional en el campo de la electricidad atmosférica.



Tormenta fotografiada desde la Estación Espacial Internacional. Sobreimpresionada, una de las imágenes captadas por la cámara 337 nm de ASIM de una de las descargas tipo corona. Créditos: ESA y Soler et al. (2020)

AGENDA

CONFERENCIAS DE DIVULGACIÓN EN EL IAA CICLO LUCAS LARA

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

http://www.iaa.es/lucas_lara



DESTACADOS

DÍA INTERNACIONAL DE LA MUJER EN LA INGENIERÍA

El pasado 23 de junio se celebró el Día Internacional de la Mujer en la Ingeniería. Con la promulgación de este día por parte de la UNESCO se pretende concienciar a nivel internacional sobre la importancia de esta profesión ejercida cada vez más por mujeres, constituyendo una notable oportunidad profesional para las futuras generaciones y contribuyendo al desarrollo económico de las sociedades a nivel global. En el IAA lo celebramos con una mesa redonda, con la participación de seis mujeres que trabajan en diferentes aspectos de ingeniería en astrofísica, que van desde la ingeniería mecánica, de sistemas, electrónica, datos y software. Disponible en nuestro canal de Youtube (youtube.com/iaaudc).



<https://bit.ly/3kieMTC>

EL RADIOSCOPIO. SAINETE APOCALÍPTICO PARA EL FINAL DE LA TEMPORADA

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.

Para el último episodio de la temporada, se produjo un programa que narra una historia apasionante. El pasado 12 de febrero de 2020 dos estudiantes de secundaria de Filipinas descubrieron por casualidad un nuevo asteroide como parte de un programa educativo promovido por la Unión Astronómica Internacional. El asteroide, denominado originalmente como 2020WC3, era un cuerpo de cerca de un centenar de metros de tamaño perteneciente a la familia de los asteroides Atón. Los primeros análisis le situaron en una trayectoria que le llevaría a impactar contra la Tierra en 2021, en algún lugar de la península ibérica en la frontera entre Portugal y España. Con el tiempo a este asteroide se le conocerá como "El Asteroide Salamanca".

radioscopio.iaa.es

