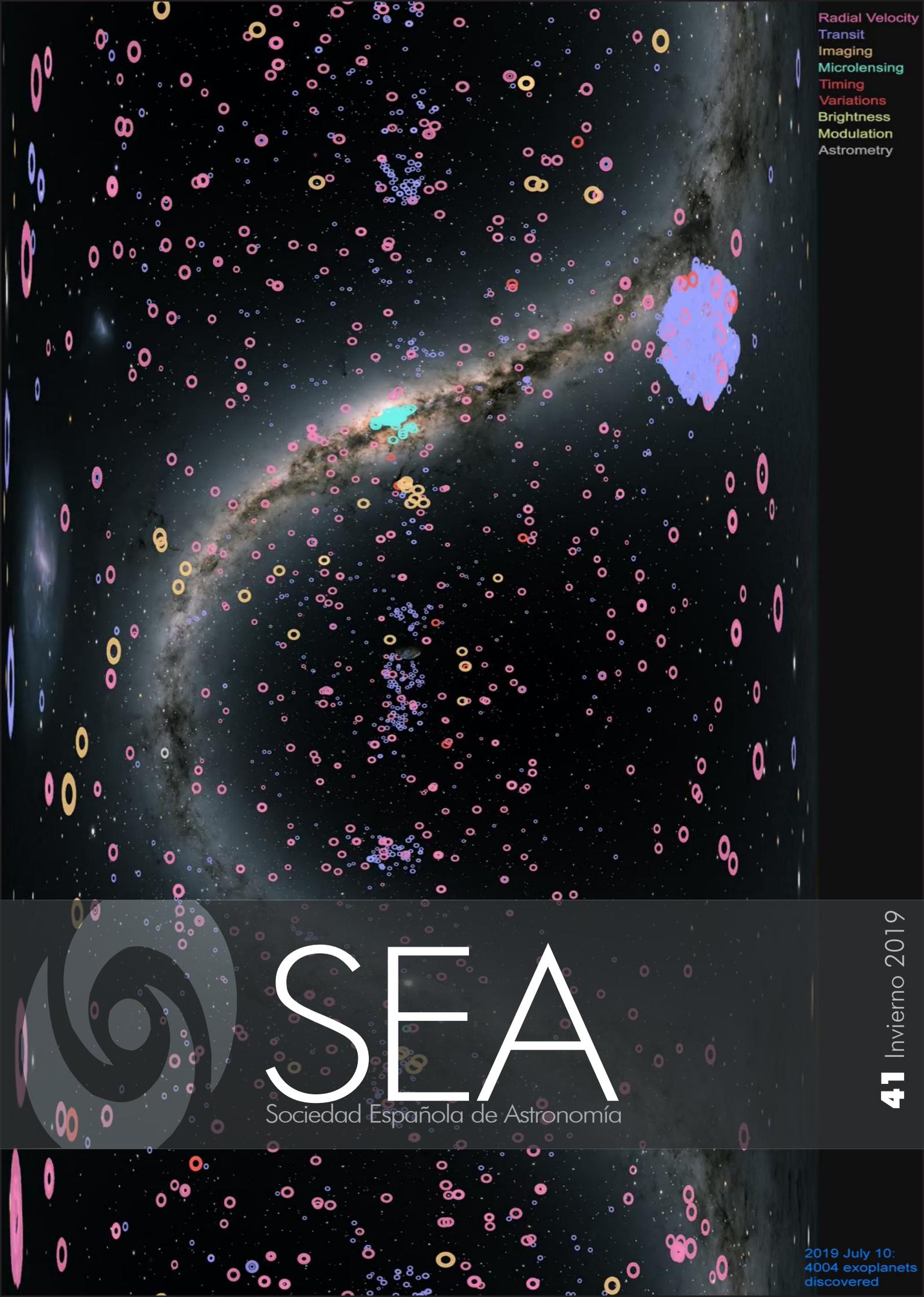


Radial Velocity
Transit
Imaging
Microlensing
Timing
Variations
Brightness
Modulation
Astrometry

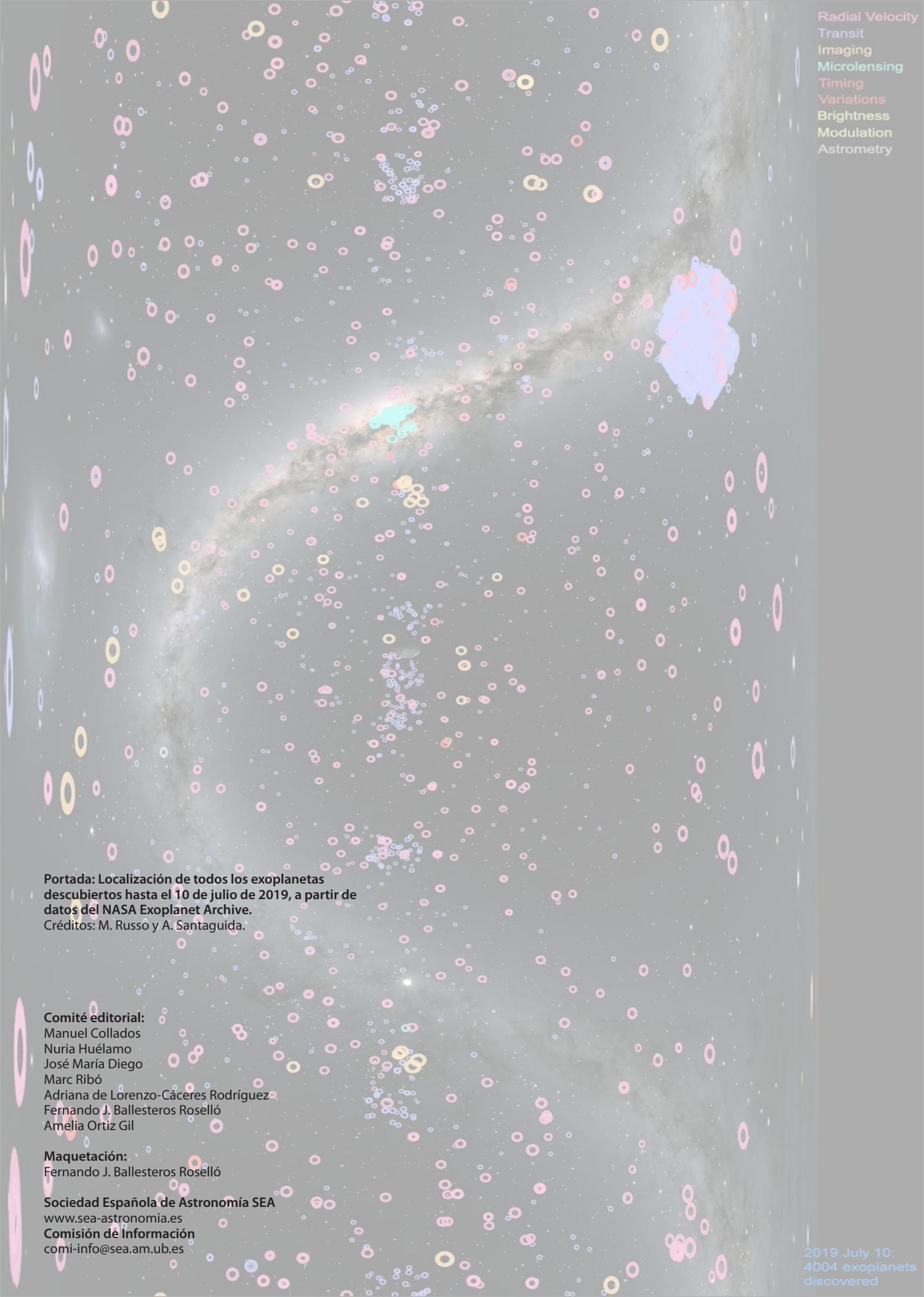


SEA

Sociedad Española de Astronomía

41 Invierno 2019

2019 July 10:
4004 exoplanets
discovered



Radial Velocity
Transit
Imaging
Microlensing
Timing Variations
Brightness Modulation
Astrometry

Portada: Localización de todos los exoplanetas descubiertos hasta el 10 de julio de 2019, a partir de datos del NASA Exoplanet Archive.
Créditos: M. Russo y A. Santaguida.

Comité editorial:

Manuel Collados
Nuria Huélamo
José María Diego
Marc Ribó
Adriana de Lorenzo-Cáceres Rodríguez
Fernando J. Ballesteros Roselló
Amelia Ortiz Gil

Maquetación:

Fernando J. Ballesteros Roselló

Sociedad Española de Astronomía SEA

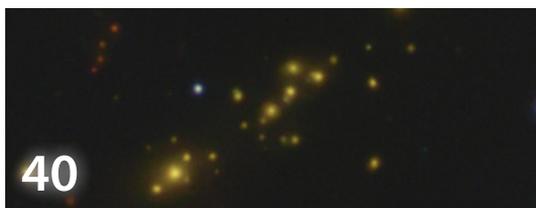
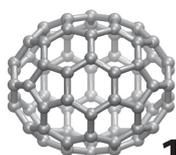
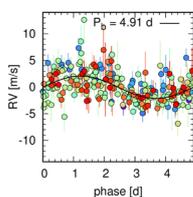
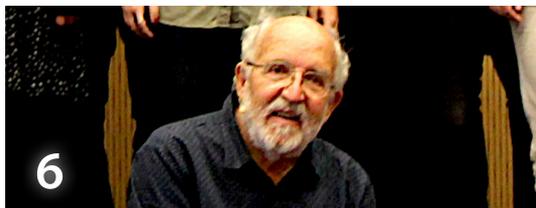
www.sea-astronomia.es

Comisión de Información

comi-info@sea.am.ub.es

2019 July 10:
4004 exoplanets
discovered

CONTENIDOS



- 5 Editorial
- 6 Exoplanetas: presente, pasado y futuro. Michel Mayor y Didier Queloz, premios Nobel de física 2019
- 8 El instrumento CARMENES y los exoplanetas del entorno solar
- 12 Los fullerenos: una frecuente arquitectura molecular del carbono en el espacio
- 20 Un universo de talento: los beneficios de la astronomía inclusiva
- 32 *Comet Interceptor*: la caza espacial de un cometa
- 40 El cartografiado J-PAS
- 44 Ecos de (la) Sociedad
- 45 Libros
- 46 Tesis doctorales



Como es habitual, coincidiendo con cada solsticio, los miembros del Comité Editorial y de la Junta Directiva tenemos el placer de presentar este nuevo ejemplar de nuestro Boletín. Con él pretendemos dar información variada sobre diferentes temas de interés general y de acontecimientos ocurridos en los últimos meses.

El pasado mes de octubre recibimos la agradable noticia de la concesión del premio Nobel de física, de manera compartida, a James Peebles, por sus avances en cosmología física, y a Michel Mayor y Didier Queloz, por su descubrimiento de un exoplaneta que orbita alrededor una estrella de tipo solar. El anuncio coincidió con una visita que estaba realizando Michel Mayor a nuestro país. Como es natural, todos los planes de la visita se trastocaron. José Antonio Caballero vivió directamente esta experiencia y nos cuenta detalles de esos días.

En este importante intento de seguir localizando exoplanetas que orbitan alrededor de las estrellas más frías, son de destacar los resultados alcanzados con el instrumento CARMENES instalado en el telescopio de 3.5 m en el Observatorio de Calar Alto. Ignasi Ribas nos presenta un resumen de estos logros.

Susana Iglesias-Roth nos presenta los fullerenos, unas moléculas de carbono puro que fueron descubiertas en 1985 al realizar experimentos destinados a reproducir la química de las atmósferas de las estrellas gigantes rojas. Posteriormente, fueron detectados en diversos objetos astronómicos. Susana nos revela los aspectos que los caracterizan.

En un trabajo inmenso y encomiable, Amelia Ortiz, Enrique Pérez Montero y Andrés Gálvez nos cuentan sus esfuerzos para una astronomía inclusiva que acerque nuestra disciplina a aquellas personas con algún tipo de discapacidad. En su artículo, nos describen diversas actividades que se han llevado a cabo.

Luisa Lara y Pedro J. Gutiérrez nos revelan los entresijos de Comet Interceptor, una misión para ir a un cometa. Luisa y Pedro nos describen la importancia de este proyecto y cómo se llegó a aprobar la primera misión FAST por parte de ESA.

El Observatorio Astrofísico de Javalambre sigue haciendo públicos sus trabajos. Hace justamente un año, se publicó en este mismo Boletín la información sobre los primeros datos públicos observados por el proyecto J-PLUS. Ahora, Carlos Hernández Monteagudo nos habla del cartografiado J-PAS y de sus peculiaridades.

Amelia Ortiz nos trae también, y como siempre, los Ecos de Sociedad con noticias interesantes acaecidas estos últimos meses. Adriana de Lorenzo nos recopila la información de las tesis recientes. La reseña del libro viene esta vez de la mano de Vicent Martínez y nos recomienda el libro "*Las mil caras de la luna*" de nuestra compañera Eva Villaver.

El Comité Editorial y la Junta Directiva confiamos en que os resulte atractivo el contenido de este Boletín y aprovechamos para desearos unas felices fiestas y que el nuevo año 2020 sea muy productivo.

Recreación artística de la posible vista desde la superficie de uno de los planetas del sistema TRAPPIST-1. Créditos: ESO.

Manuel Collados
Instituto de Astrofísica de Canarias
Universidad de La Laguna

EXOPLANETAS: PRESENTE, PASADO Y FUTURO

Para los que trabajamos en objetos subestelares, 1995 fue un “annus mirabilis”. Con una separación de unos pocos meses a finales de ese año, las primeras enanas marrones y el primer exoplaneta fueron anunciados: las enanas marrones por Rafael Rebolo, María Rosa Zapatero Osorio y Eduardo L. Martín (Teide 1) y un grupo estadounidense liderado por Tadashi Nakajima (GJ 229 B), y el exoplaneta por una pareja de astrofísicos suizos, Michel Mayor y su estudiante de tesis doctoral en aquel momento, Didier Queloz. Al exoplaneta lo bautizaron 51 Peg b, con b minúscula, por orbitar 51 Peg, una estrella casi idéntica a nuestro Sol y a solo 15 pc de distancia.



José A. Caballero
Centro de Astrobiología
caballero@cab.inta-csic.es

En realidad, Alexander Wolszczan y Dale Frail habían anunciado, en dos trabajos en 1992 y 1994, el descubrimiento de tres exoplanetas orbitando muy cerca de un púlsar, e incluso en 1989 un grupo canadiense liderado por Bruce Campbell había anunciado también otro exoplaneta alrededor de γ Cep A, una estrella normal como 51 Peg. Sin embargo, en 1992 la retractación de los planetas alrededor de γ Cep A (que luego fue confirmado en 2002) y de un segundo púlsar (para el que no se tuvo en cuenta la corrección baricéntrica terrestre) había dejado un ambiente poco propicio hacia los cazadores de exoplanetas. Además, 51 Peg b ofrecía otras desventajas. Primero, el método Doppler de velocidad radial, aunque aplicado durante más de un siglo en la determinación de parámetros de binarias espectroscópicas, solo da la masa mínima del exoplaneta, $M_2 \sin i$; dependiendo del ángulo de inclinación de la órbita del candidato a exoplaneta, i , este puede ser realmente un exoplaneta con masa por debajo del límite de combustión de deuterio, $13 M_{\text{Jup}}$, una enana marrón o incluso una estrella de baja masa. Segundo, el “año” (periodo orbital) de 51 Peg b, en vez de ser del orden de 365 días como la Tierra, era de... ¡apenas 4.23 días!

Afortunadamente la Ciencia (con mayúsculas) siguió su curso, y otra pareja de astrofísicos, esta vez estadounidenses, Geoffrey Marcy and R. Paul Butler, confirmaron a los pocos meses que la señal de velocidad radial que Michel Mayor y Didier Queloz habían medido durante dos temporadas en 51 Peg con un espectrógrafo instalado en el Observatoire de Haute-Provence no eran pulsaciones estelares, sino realmente el efecto del tirón gravitatorio de 51 Peg b. Geoff y Paul no solo confirmaron la existencia del exoplaneta con observaciones en una tercera época y con un instrumento distinto, sino que descubrieron también 70 Vir b y 47 UMa b. En primavera de 1996 solo se conocían tres exoplanetas alrededor de estrellas normales. Ni el cazador de exoplanetas más optimista podía imaginar en aquella época que una generación después los exoplanetas se contarían por miles y que serían “el pan de cada día” de sus jóvenes compañeros.

Desde 1996, Michel Mayor y Didier Queloz fueron candidatos al Premio Nobel de Física casi ininterrumpidamente. La mitad de las veces, especial-

MICHEL MAYOR Y DIDIER QUELOZ, PREMIOS NOBEL DE FÍSICA 2019

Michel Mayor rodeado de estudiantes de doctorado y jóvenes postdocs del CAB y UCM y *research fellows* y *trainees* de ESAC tras su seminario invitado el 10 de octubre de 2019 (ESA-E. Fletcher).



mente a finales los 90 y principios de los 2000, estuvieron en la lista corta. Pero, ¿por qué tardó tanto el Comité de los Nobel en darles su merecido Premio? Hasta este otoño, esta era una pregunta repetida en el campo. Unos decían que Didier Queloz era demasiado joven y locuaz, otros que Alexander, Dale, Geoff y Paul también se lo merecían, pero todos coincidíamos en que, con 77 años, podía ser demasiado tarde para Michel.

Por eso ayudé todo lo que pude a mi amigo Félix Llorrente, miembro reciente de la SEA a pesar de haber empezado a trabajar en astrofísica en los 70, cuando este me dijo que era amigo íntimo de Michel y que quería invitarle a venir a España. Félix y Michel habían sido compañeros y camaradas en la Université de Genève tiempo atrás, y conservan una gran amistad entre ellos y sus respectivas familias. Así, con ayuda de la ESA European Space Astronomy Centre Faculty y del Centro de Astrobiología, Félix y yo conseguimos financiación para traer a Michel acompañado de Françoise, su esposa. El plan estaba bien definido: unos días “de vacaciones” en San Sebastián (en realidad, cuidando de sus nietos mientras uno de sus hijos iba de boda); el martes al mediodía cogerían el avión a Madrid; el miércoles

Michel participaría una mesa redonda en Torrejón de Ardoz (CAB); el jueves daría un seminario invitado en Villafranca del Castillo (ESAC); el viernes daría una charla divulgativa en Almagro; y el sábado volvería a su casa cerca de Lausanne...

Pero algo ocurrió la mañana del martes 8 de octubre mientras Michel y Françoise salían del apartamento de San Sebastián de camino al aeropuerto: ila Real Academia Sueca de Ciencias anunció que Michel y Didier (y John Peebles) recibirían el Premio Nobel de Física! A partir de ahí, todo fue una montaña rusa para Michel, Françoise, Félix y para mí: desde la recepción en el aeropuerto con periodistas con cámaras nada más llegar a Madrid, a una “parada técnica” para reunirnos con Pedro Duque, Ministro de Ciencia, Innovación y Universidades, de camino al aeropuerto para coger su vuelo de vuelta a Ginebra, pasando por una conexión en directo para el telediario de la televisión nacional suiza desde la Residencia de Estudiantes, por docenas de entrevistas, por un paseo por la feria de Alcalá de Henares el día del bautizo de Cervantes y hasta por firmar autógrafos en la calle. Y, en todo momento, ni Michel ni Françoise perdieron la sonrisa ni la paciencia. Para mí fue un orgullo ser escudero de tales nobles caballero y dama.

EL INSTRUMENTO CARMENES

Durante las últimas tres décadas hemos vivido el crecimiento exponencial de un nuevo campo en la astrofísica, el estudio de los exoplanetas. El pistoletazo de salida lo dio en 1995 el anuncio del descubrimiento de un planeta fuera del sistema solar, el exoplaneta 51 Peg b, por parte de Michel Mayor y Didier Queloz. Este hallazgo les ha valido recibir el Premio Nobel de Física 2019. A pesar de existir otros sugerentes descubrimientos anteriores, como el ahora clasificado como planeta de alta masa γ Cep A b (Campbell, Walker y Yang 1988) y los planetas del púlsar PSR B1257+12 (Wolszczan y Frail 1992), el anuncio de 51 Peg b se considera de forma prácticamente unánime como el detonante de la revolución de los exoplanetas.



Ignasi Ribas

Institut de Ciències de l'Espai (ICE, CSIC)
Institut d'Estudis Espacials
de Catalunya (IEEC)
iribas@ice.cat

El motivo principal es que se trataba de un objeto con una masa mínima lo suficientemente baja para no albergar dudas sobre su naturaleza planetaria (excepto para improbables inclinaciones orbitales extremas) y que además está en órbita alrededor de una estrella de tipo solar, totalmente "normal".

Durante los primeros años de búsqueda exoplanetaria, el foco de la investigación se centraba en estrellas de tipo solar (GK), cuyas propiedades las hacían más adecuadas para el uso de la técnica espectroscópica Doppler. Para las estrellas G y K que rotan lentamente, que son la mayoría, las líneas espectrales son numerosas, profundas y estrechas, lo que permite determinaciones precisas de velocidad radial, y además los efectos de la actividad magnética no son limitantes al nivel de unos pocos $m s^{-1}$. Tras una decena de planetas en estrellas de tipo solar, en 1998 se anunció el primer planeta alrededor de una estrella fría, de tipo espectral M, Gl 876 b (Marcy et al. 1998; Delfosse et al. 1998). Esto significaba la tímida apertura de lo que ahora conocemos como la "oportunidad de las enanas M". Los motivos por los cuales estas pequeñas estrellas son interesantes residen en el mayor efecto de la señal de un planeta debido a su baja masa y radio, y además en las mejores opciones de detección de planetas en órbitas templadas debido al período orbital relativamente corto. Pero, además, la gran mayoría de las estrellas del entorno solar más inmediato son frías, de tipo espectral M, lo que abriría a la puerta a caracterizar su población planetaria.

En el marco de los esfuerzos para encontrar exoplanetas cercanos, en 2012 saltó la noticia cuando Dumusque et al. anunciaron el descubrimiento de un planeta con una masa mínima parecida a la Tierra alrededor de α Cen B, a tan solo 4.3 años luz. El hallazgo resultaba de exprimir hasta el límite los numerosos datos obtenidos con el espectrómetro HARPS, en el observatorio de ESO en La Silla. Desafortunadamente, en 2015 se demostró que la función de ventana del muestreo había conspirado con la variabilidad magnética de la estrella para dar una señal espuria que fue erróneamente interpretada como el planeta. Nuestro vecino se desvanecía. En 2016 la situación cambió de nuevo al anunciarse el descubrimiento de Proxima Centauri b por parte del equipo Red Dots, liderado por Guillem Anglada-Escudé. Se trataba de un exoplaneta con una masa mínima un 30% superior

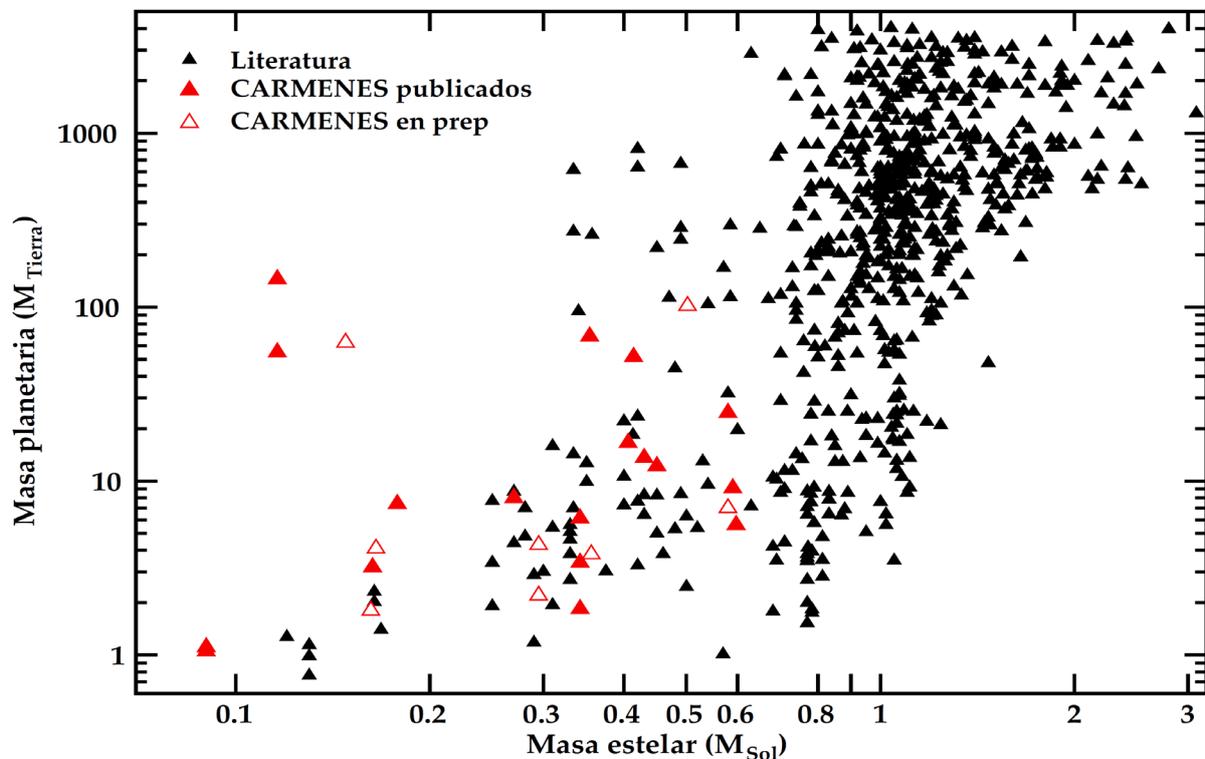


Figura 1: Diagrama de la masa de la estrella frente a la masa del planeta para aquellos descubiertos mediante la técnica de velocidades radiales. Nótese la acumulación en estrellas de tipo solar y planetas gigantes. Los descubrimientos de CARMENES están marcados en rojo y expanden el espacio de parámetros hacia estrellas más frías. En particular, para estrellas con masas inferiores a 0.2 masas solares, CARMENES ha descubierto 9 planetas, comparados con los 7 hallados por otros instrumentos.

a la de la Tierra, a tan solo 4.2 años luz de nosotros. Ahora sí, se nos revelaba el exoplaneta más cercano que, además, se sitúa en una órbita templada alrededor de su estrella. Con este y otros descubrimientos, la mayor parte de ellos realizados con el instrumento HARPS, en la última década hemos visto como se iba poblando de planetas el vecindario galáctico del Sol.

El año 2016 también coincidió con la puesta en funcionamiento del instrumento CARMENES, llamado a hacer una contribución muy relevante a nuestro conocimiento de los exoplanetas alrededor de las estrellas frías y, claro está, necesariamente cercanas. CARMENES se encuentra instalado en el telescopio de 3.5 m en el Observatorio de Calar Alto y fue construido por un consorcio de 11 instituciones españolas y alemanas, con una financiación mayormente aportada por la sociedad Max Planck y por el CSIC. CARMENES se concibió para explotar la oportunidad de las estrellas enanas M mediante la obtención de espectrometría muy precisa en un amplio rango de longitudes de onda y así hallar exoplanetas rocosos en órbitas templadas. El diseño,

usando dos canales independientes, le proporciona una cobertura que abarca desde los 520 nm hasta los 1710 nm, es decir, incluyendo el rojo, el rojo lejano y el infrarrojo cercano, y obtiene datos con una resolución espectral alrededor de 90000. Pero el aspecto más importante es que su control de temperatura y su óptica en vacío le confieren una estabilidad espectacular, de forma que es posible tomar datos de espectrometría Doppler con una precisión del orden de 1 m s^{-1} para el canal visible y unos $3\text{-}5 \text{ m s}^{-1}$ para el canal infrarrojo en series temporales de muy larga duración.

Cuatro años después de su entrada en funcionamiento, y tras más de 15000 medidas tomadas con ambos canales, los descubrimientos que se han sucedido son espectaculares. En cuanto a números, CARMENES es responsable del hallazgo de 18 nuevos planetas publicados y otros 8 cuyas publicaciones están en proceso de preparación. Estos planetas son especialmente valiosos puesto que pueblan una región del espacio de parámetros que hasta ahora no había sido muestreada en detalle, como se ilustra en la Figura 1. Es más, 9 de

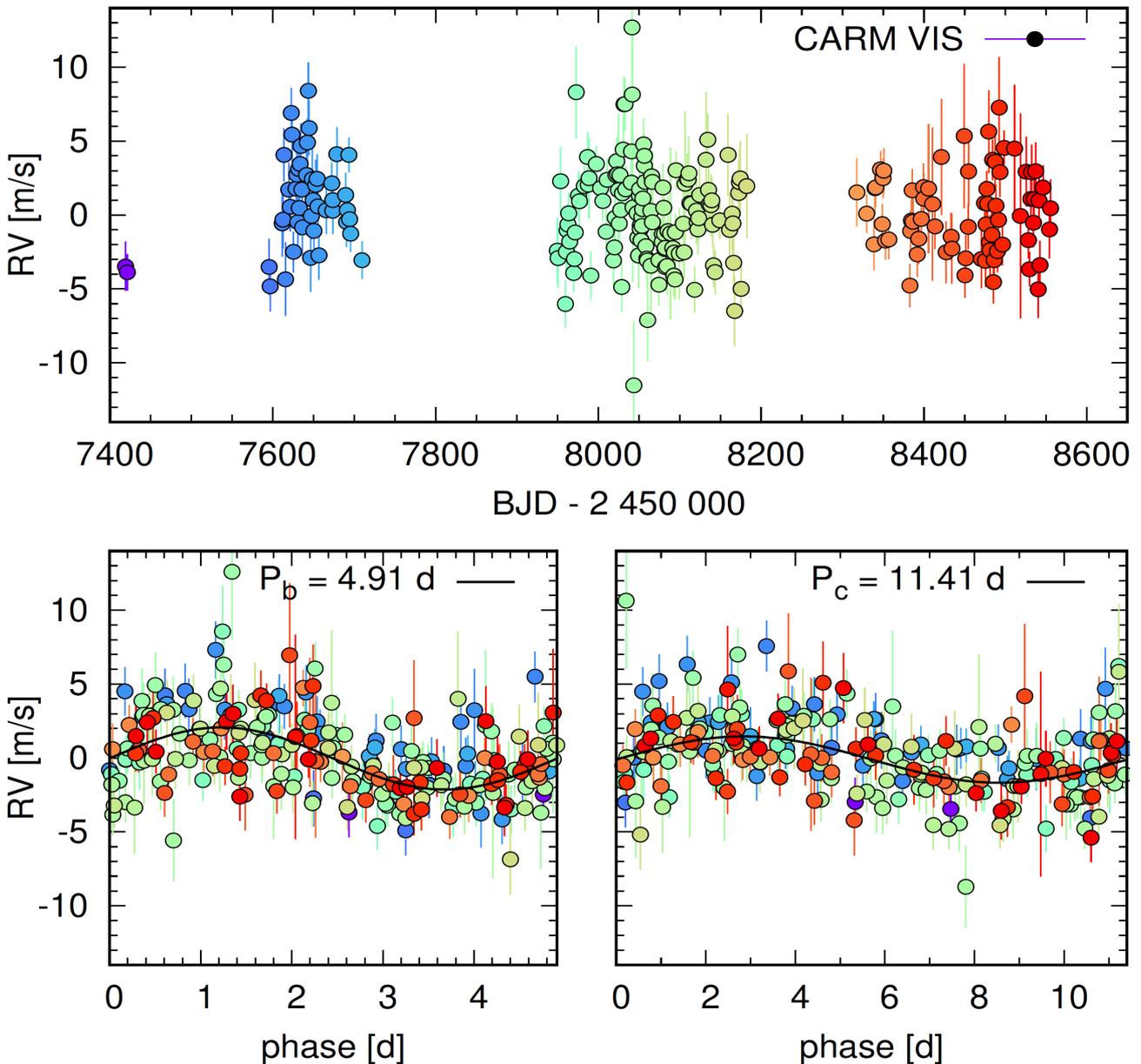


Figura 2: Arriba: Serie temporal de velocidades radiales de la estrella de Teegarden tomada con el canal visible de CARMENES. Abajo: Curva de velocidad radial plegada con el periodo orbital determinado para cada una de las señales planetarias. El ajuste del planeta b, con un periodo de 4.91 días, corresponde a una semi-amplitud de velocidad de $2.0 \pm 0.2 \text{ m s}^{-1}$, lo que indica una masa mínima de 1.05 ± 0.13 masas terrestres. El ajuste del planeta c proporciona una semi-amplitud de velocidad de $1.6 \pm 0.2 \text{ m s}^{-1}$ y una masa mínima de 1.11 ± 0.16 masas terrestres. Los planetas tienen una insolación de su estrella que es 1.15 y 0.37 veces, respectivamente, la que recibe la Tierra de nuestro Sol.

los descubrimientos corresponden a planetas alrededor de estrellas con masas inferiores a 0.2 masas solares. Antes se conocían solo 7, con lo que se ha más que doblado el número. Entre la “fauna” de planetas descubiertos por CARMENES encontramos planetas de la masa de Neptuno en órbitas templadas, planetas en sorprendentes órbitas cerradas pero excéntricas,

planetas en sistemas estelares binarios, planetas alrededor de estrellas activas, o el segundo planeta con tránsitos más cercano, por citar unos cuantos.

Pero si hay que destacar algunos, hay tres descubrimientos que merecen mención aparte. El primer gran anuncio fue el hallazgo de una súper-Tierra

fría alrededor de la estrella de Barnard (Ribas et al. 2018), el segundo sistema estelar más cercano a nosotros. Este elusivo planeta fue detectado gracias a la combinación de centenares de medidas de velocidad radial durante más de dos décadas y usando diversos instrumentos, entre los cuales CARMENES jugó un rol esencial. A mediados de 2019 se publicó el descubrimiento de un sistema planetario con al menos dos planetas alrededor de la estrella ultrafría que lleva el nombre de Teegarden (Zechmeister et al. 2019). CARMENES demostraba una capacidad única de tomar espectrometría Doppler precisa para estrellas de tan baja masa. La Figura 2 muestra la serie temporal de velocidades radiales y las curvas de velocidad plegadas en fase. Con amplitudes de velocidad por debajo de 2 m s^{-1} , los dos planetas tienen masas mínimas idénticas a la de la Tierra y están situados en la llamada zona de habitabilidad alrededor de su estrella, donde se podrían dar las condiciones adecuadas para la existencia de agua líquida en sus superficies. Los planetas de Teegarden se encuentran a tan solo 12 años luz de nosotros. Y finalmente, en septiembre de 2019 se hizo público el descubrimiento de GJ 3512 b (Morales et al. 2019), un planeta gigante orbitando a una estrella con una masa diez veces inferior al Sol. Explicar su existencia supone un reto imposible para los modelos más recientes de formación planetaria por acreción de núcleo y obliga a recurrir a explicaciones más “exóticas”, como es la formación por inestabilidad gravitacional del disco protoplanetario.

Todos estos descubrimientos, al ponerlos en contexto, nos proporcionan información valiosa sobre la arquitectura de los sistemas planetarios, sobre la tasa de ocurrencia de planetas y, por extensión, sobre los mecanismos que llevan a su formación. Pero también nos permiten cartografiar el entorno que nos rodea y poner a nuestro sistema solar, con su Tierra, en contexto. Hoy conocemos 18 planetas en órbita alrededor de las 40 estrellas más cercanas. Casi la mitad de ellos han sido descubiertos por el instrumento CARMENES y la colaboración Red Dots, mayormente empleando el instrumento HARPS. Estas iniciativas están proporcionando un censo preciso de los planetas más cercanos.

Como se ha mencionado anteriormente, estos planetas no solo revisten un interés colectivo, sino que algunos de ellos, como Proxima Cen b, Teegarden

b y c, etc, están en órbitas templadas que permiten clasificarlos como potencialmente habitables. No es difícil soñar con que algún día la tecnología avanzará lo suficiente para poder tomar imágenes directas de estos planetas y estudiar los constituyentes químicos y las propiedades físicas de sus atmósferas. Tal vez alguno de estos ellos pase de ser potencialmente habitable a habitable (con agua líquida en su superficie), e incluso habitado (con una biosfera). Las misiones que nos llevarán a realizar este salto cualitativo se están concibiendo en la actualidad, aunque no se espera que estén en operación hasta la década de los 40. Cuando lo estén, muy probablemente estos planetas cercanos que ahora estamos descubriendo se encontrarán entre sus objetivos predilectos.

REFERENCIAS

- Anglada-Escudé, G., et al. “A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri”, 2016, *Nature*, 536, 437.
- Campbell, B., Walker, G. A. H., Yang, S., “A search for substellar companions to solar-type stars, 1988, *The Astrophysical Journal*, 331, 902.
- Delfosse, X., Forveille, T., Mayor, M., Perrier, C., Naef, D., Queloz, D., “The closest extrasolar planet. A giant planet around the M4 dwarf Gl 876”, 1998, *Astronomy & Astrophysics*, 338, L67.
- Dumusque, X., Pepe, F, Lovis, C., Ségransan, D., Sahlmann, J., Benz, W., Bouchy, F., Mayor, M., Queloz, D., Santos, N., Udry, S., “An Earth-mass planet orbiting α Centauri B”, 2012, *Nature*, 491, 207.
- Marcy, G. W., Butler, R. P., Vogt, S. S., Fischer, D., Lissauer, J. J., “A Planetary Companion to a Nearby M4 Dwarf, Gliese 876”, 1998, *The Astrophysical Journal*, 505, L147.
- Mayor, M., Queloz, D., “A Jupiter-mass companion to a solar-type star”, 1995, *Nature*, 378, 355.
- Morales, J. C., et al., “A giant exoplanet orbiting a very-low-mass star challenges planet formation models”, 2019, *Science*, 365, 1441.
- Ribas, I., et al., “A candidate super-Earth planet orbiting near the snow line of Barnard's star”, 2018, *Nature*, 563, 365.
- Wolszczan, A., Frail, D. A., “A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12”, 1992, *Nature*, 355, 145.
- Zechmeister, M., et al., “The CARMENES search for exoplanets around M dwarfs. Two temperate Earth-mass planet candidates around Teegarden's Star”, 2019, *Astronomy & Astrophysics*, 627, A49.

Los fullerenos fueron descubiertos en 1985 al realizar experimentos destinados a reproducir la química de las atmósferas de las estrellas gigantes rojas (Kroto et al., 1985). Son moléculas de carbono puro y junto al grafito y diamante constituyen las tres formas alotrópicas del carbono.

1. INTRODUCCIÓN

En el laboratorio, la molécula de fullereno más abundante es el C_{60} , seguida por el C_{70} . El C_{60} es una molécula hueca con 60 átomos de carbono, distribuidos en 12 pentágonos y 20 hexágonos siguiendo la simetría de icosaedro truncado, como un balón de fútbol clásico (ver figura 1). El radio de la molécula es aproximadamente 3.55 Å. La estructura electrónica del C_{60} consta de 60 orbitales atómicos $2p_z$ y 180 orbitales híbridos sp_2 . Los fullerenos (C_{60} , C_{180} , C_{240} , C_{540} ...) con número de átomos de carbono $20(m^2 + n^2 + nm)$, donde n y m son enteros, tienen simetría icosaédrica I_h y presentan alta estabilidad. La estructura de los fullerenos en hexágonos y pentágonos, les dota de esa gran estabilidad, siendo muy resistentes a intensos campos de radiación (rayos UV, radiación gamma) e incluso al bombardeo con partículas muy energéticas (rayos cósmicos), fenómenos muy presentes en el universo. El fullereno C_{70} no presenta una simetría icosaédrica, pero es el segundo más estable y su forma es como la de un balón de rugby (figura 2).

La familia de fullerenos incluye nanotubos (fullerenos con simetría cilíndrica) y fullerenos endohédricos con átomos pequeños (He, Ne, etc.) dentro de la jaula. Otro tipo de fullerenos son los llamados buckyonions, conformados por varias conchas concéntricas de fullerenos a modo de una cebolla, con separaciones de orden 3.4-3.5 Å. Estas moléculas, que muestran una estabilidad aún mayor que los fullerenos icosaédricos individuales, fueron primero sintetizados mediante bombardeo electrónico sobre hollín de carbono (Ugarte, 1992). Otra tecnología para producir buckyonions se basa en el recocido de hollín de carbono y nanodiamantes a temperaturas de 2000 K (Kuznetsov et al., 1994; Tomita et al., 1999, 2001) y por deposición de iones de carbono en sustratos metálicos (Cabioch 1995; 1997). Son muy interesantes los fullerenos hidrogenados (C_nH_m), donde los electrones pi forman un enlace con el hidrógeno. Las propiedades de estos fullerenos no están tan bien determinadas como las de los fullerenos individuales por lo que hemos trabajado más en su caracterización en laboratorio desde el 2006 para lograr medir sus propiedades ópticas e infrarrojas y en particular su absorptividad molar (ver, por ejemplo, Cataldo e Iglesias-Groth 2010).



Susana Iglesias-Groth
Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)
sigroth@iac.es

Fig.1.-Representación del fullereno C_{60}

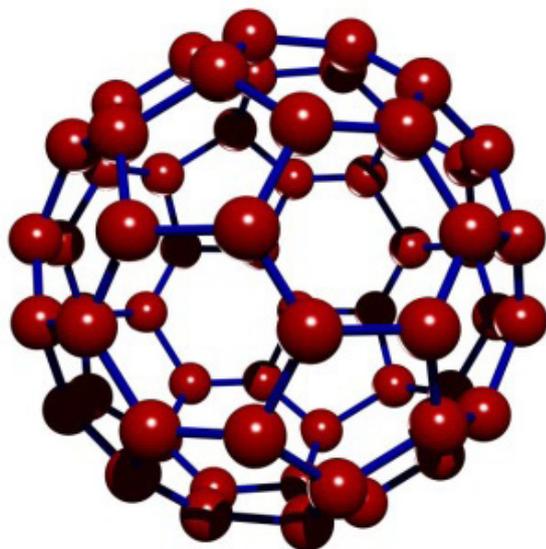
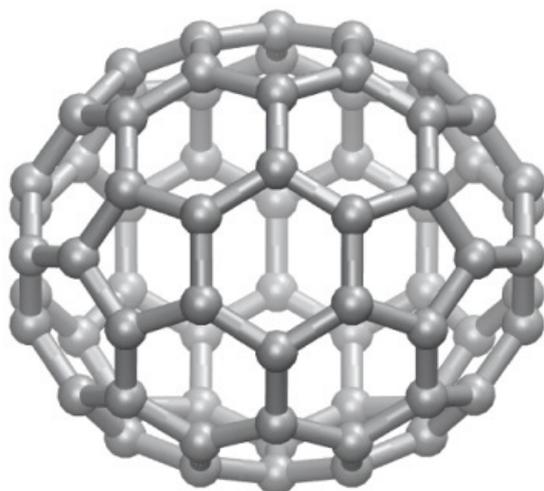


Fig. 2.-Representación del fullereno C_{70}



2. DETECCIÓN DE FULLERENOS

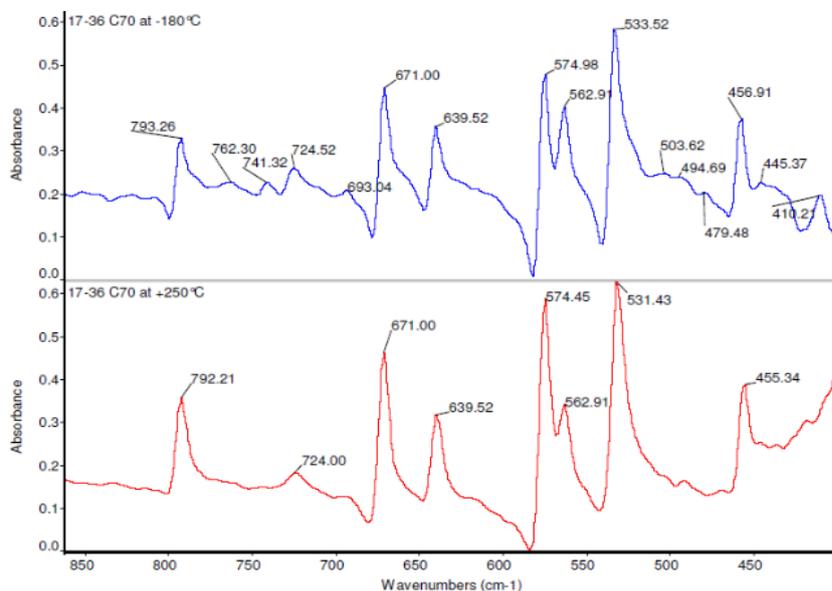
Inicialmente los fullerenos se han detectado en meteoritos del tipo condrita carbonácea. Estos meteoritos probablemente se originaron al principio del sistema solar. La espectroscopía de masas del meteorito Allende (México 1969), el meteorito de Murchinson (Australia 1969) y el meteorito del lago Tagish (Canadá) mostró abundancias de fullerenos de orden 0.1 ppm (Becker et al. 1994, 1997, 1999; Pizzarello et al., 2001), aunque estas medidas son todavía objeto de controversia. En la tierra, los fullerenos se han detectado en las capas sedimentarias del Cretácico Terciario en China, Bulgaria y Nueva Zelanda con igual abundancia que la detectada en los meteoritos y en mineral shunghita de la región de Carelia (Rusia). A pesar de su estabilidad en el espacio, en la tierra, en contacto con el ozono, se disgregan en cuestión de horas en hexágonos y pentágonos de carbono.

2.1 Espectroscopía infrarroja de fullerenos y su descubrimiento en el espacio

La espectroscopía de laboratorio en el IR medio de las bandas del C_{60} y C_{70} a bajas temperaturas (ver p.ej. Iglesias-Groth, Cataldo y Manchado, 2011) es crucial para la búsqueda y la identificación de fullerenos en el espacio. Los principales rasgos en IR medio para el C_{60} son las bandas activas a 7.0, 8.5, 17.4 y 18.9 micras. Las bandas del C_{70} son mostradas en la figura 3 a dos temperaturas diferentes. Las mediciones de la capacidad de absorción son clave para derivar sus abundancias.

En 2010 Cami y sus colaboradores presentaron la detección de fullerenos C_{60} y C_{70} en la nebulosa planetaria Tc1, usando espectros del Spitzer Space Telescope. Este descubrimiento generó un gran impulso en el campo y desde entonces esas bandas en el IR medio del C_{60} han sido identificadas en varios entornos astrofísicos, incluidas las nebulosas de reflexión (Sellgren et al. 2010), nebulosas planetarias (García-Hernández et al. 2011) y estrellas en fases de evolución posteriores a la fase AGB (Gielen et al., 2011). El catión del C_{60} también se ha detectado en muchas líneas de visión del medio interestelar difuso (Foing & Ehrenfreund 1994, 1997; Walker et al. 2015; Campbell, Holz y Maier, 2016), en una nebulosa de reflexión (Berné, Mulas y Joblin, 2013) y en una nebulosa protoplanetaria (Iglesias-Groth y Esposito, 2013).

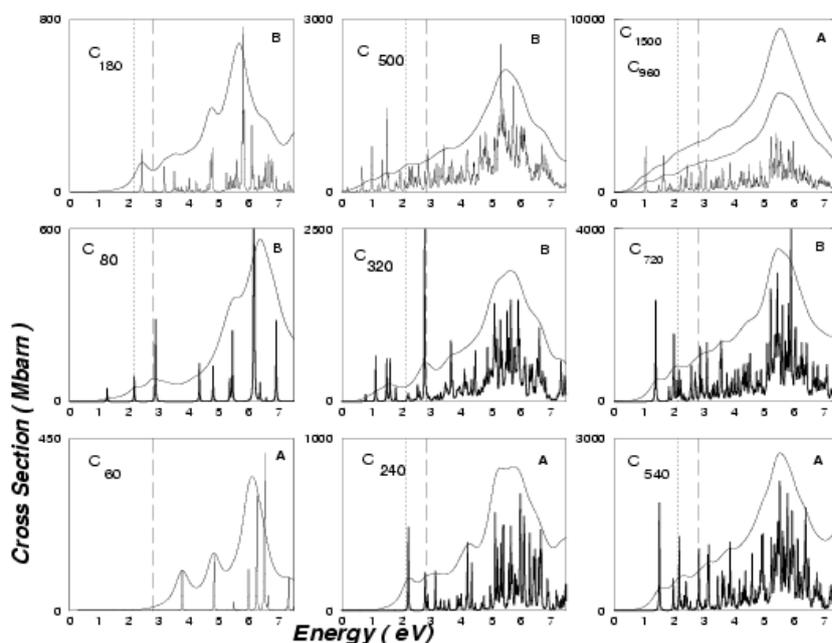
Fig. 3.- Espectro infrarrojo del C₇₀ en KBr a -180° C y a +250° C en cm⁻¹.



Las intensidades relativas de las bandas del C₆₀ en varias fuentes parecen mejor descritas por una distribución térmica que por un solo modelo de calentamiento de fotones y enfriamiento fluorescente, pero una completa comprensión de las intensidades de las bandas y el balance de ionización de los fullerenos está todavía lejos de lograrse para los diversos ambientes astrofísicos.

Parece que las etapas finales de la evolución de estrellas como el Sol favorece la producción de fullerenos. Estas moléculas son muy resistentes a la radiación UV y por lo tanto tienen largos tiempos de supervivencia en el espacio interestelar, por lo que es probable que los fullerenos originados en nebulosas planetarias progresivamente pueblen el medio interestelar y lleguen a las regiones de formación estelar.

Fig. 4.-Varios espectros teóricos de fullerenos individuales icosaédricos obtenidos con un modelo PPP.



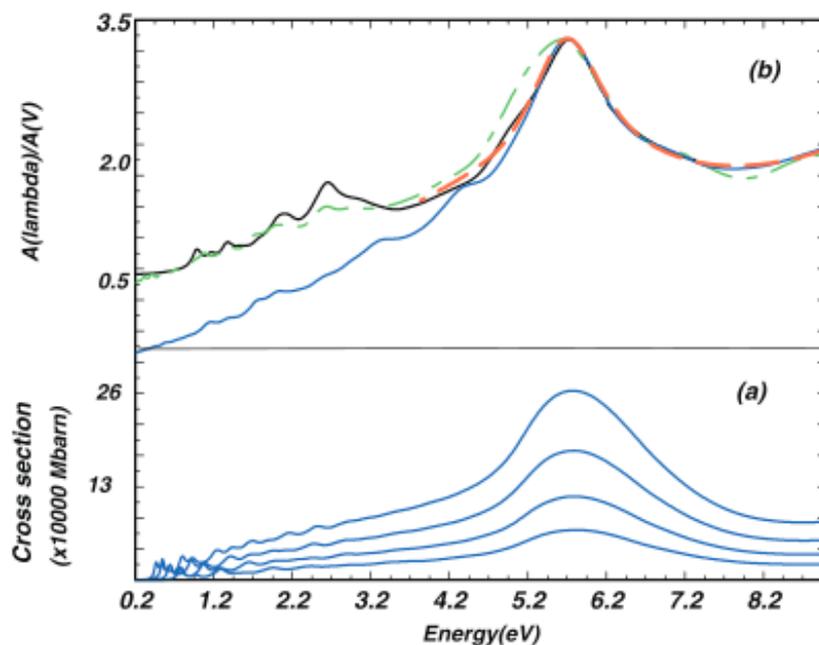


Fig. 5.- De abajo hacia arriba, (a) Secciones eficaces teóricas predichas para buckyonions de la familia $60n^2$ y con fullerenos externos C_{1500} , C_{2160} , C_{2940} y C_{3840} . (b) Curvas teóricas en comparación con observaciones del "UV Bump" a 2175 Å (5.7 eV) en el ISM difuso, $R_V=3.1$ (línea roja discontinua): La línea azul continua indica la curva de extinción predicha para una mezcla de fullerenos individuales y buckyonions siguiendo una ley de potencias para la distribución de estas moléculas, $n(R) \sim R^{-3.5}$, donde R es el radio de la molécula. La línea verde discontinua representa la curva de extinción para una distribución de fullerenos y buckyonions de C_{60} a C_{3840} adoptando un índice de ley de potencia de -2.5. La línea negra es el mejor ajuste obtenido para fullerenos icosaédricos individuales hasta 1500 átomos utilizando un índice de -3.5 en la ley de potencias.

3. LOS FULLERENOS COMO PROBABLES RESPONSABLES DEL "UV BUMP" DE EXTINCIÓN Y SU DETECCIÓN EN ESPACIO

A finales de los 90, el espectro de fotoabsorción de grandes fullerenos y buckyonions era muy poco conocido desde el punto de vista experimental. Para investigar el papel potencial de estas moléculas en absorción interestelar, como un primer paso, fue necesario usar modelos semiempíricos para calcular el espectro de fotoabsorción de los fullerenos icosaédricos (ver p. ej. Iglesias-Groth 2003, Iglesias-Groth 2004). Este enfoque teórico inicial se basó en un Modelo Hückel y Pariser-Parr-Pople (PPP), considerando la fuerte correlación electrónica, asociados al "screening" de los electrones pi en estas moléculas. Los resultados pueden verse en la figura 4, donde se muestran las secciones eficaces de fotoabsorción frente a la energía para algunos fullerenos icosaédricos individuales. Los detalles se pueden encontrar en, p.ej., Iglesias-Groth et al. (2002) e Iglesias-Groth (2003).

3.1. El Bump del UV

Las mediciones del rasgo más intenso asociado a la extinción de radiación UV / óptica en diferentes líneas visión de nuestra galaxia se pueden ver en Fitzpatrick (1999). La longitud de onda del pico de extinción está en el rango de 2193 a 2157 Å y es muy estable (2175 Å \sim 5.4 eV) y los anchos también estables están en el rango 0.96-1.55 eV. El factor de enrojecimiento habitual en el medio interestelar difuso es $R_V = 3.1$. En las figuras 5a,b se compara los espectros teóricos de los fullerenos con la curva observacional de Fitzpatrick. Se observa el notable ajuste a la curva de extinción. Basándose en las comparaciones con la curva de extinción de la Galaxia (Fig.5), Iglesias-Groth (2004) dedujo el porcentaje de carbono asociado a los fullerenos y buckyonions en el medio interestelar. La densidad numérica de estas moléculas resultó que podría estar en el rango 0.08-02 fullerenos por millón de átomos de hidrógeno. Un valor similar al medido en condritas carbonáceas y en el medio interestelar (Foing & Ehenfreund, 1997, Iglesias-Groth, 2004, 2007, 2013, 2019).

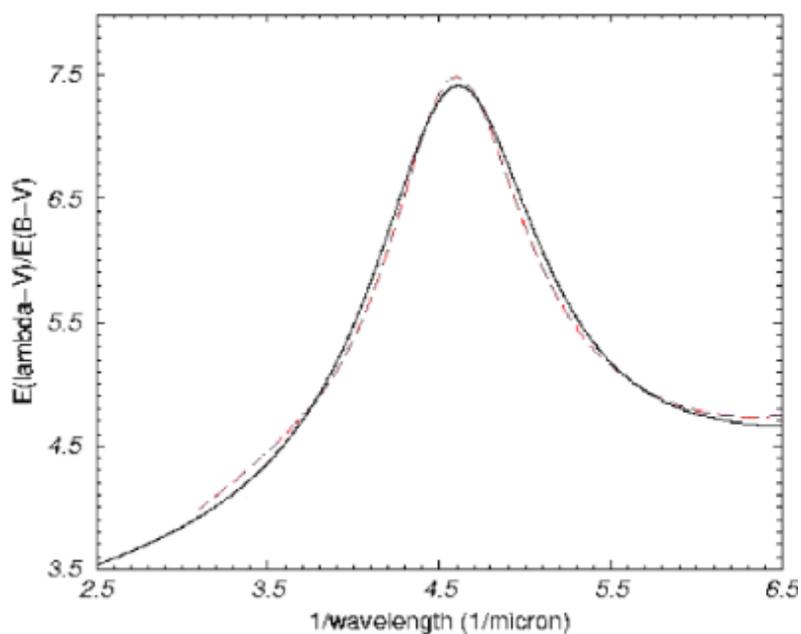


Fig. 6.- Espectro de absorción electrónica del $C_{60}H_{36}$ en n-hexano sobrepuesto a la curva de extinción para $R_V=3.1$ de Fitzpatrick 1999 (Cataldo e Iglesias-Groth, 2009).

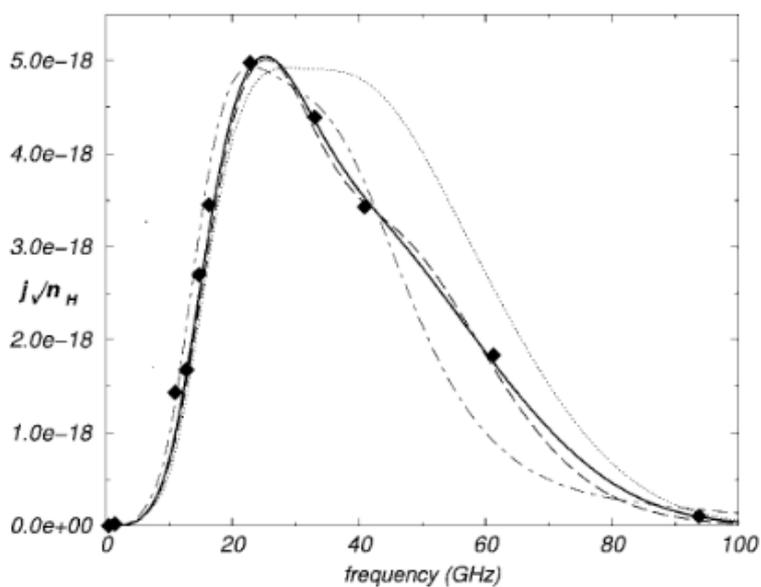


Fig. 7.- Observaciones de la emisión anómala de microondas de Perseo por Watson et al. (2005; diamantes rellenos) y la emisividad rotacional prevista por H ($Jy\ cm^2\ sr^{-1}\ H^{-1}$) de una mezcla de fullerenos y buckyoniones hidrogenados en CNM condiciones (curva punteada y curva punteada) y una combinación de CNM y condiciones WIM (curva discontinua y curva sólida).

3.2. Sobre los fullerenos hidrogenados

Considerando la gran abundancia de hidrógeno en el universo y también la nube de electrones pi de los fullerenos, esperamos que muchos estén parcialmente hidrogenados. Estudios de laboratorio realizados entre 2006 y 2011 (ver el libro de Cataldo e Iglesias-Groth 2010) dieron lugar a resultados muy interesantes para la búsqueda de estas moléculas en espacio interestelar. En la Fig. 6 podemos ver un muy buen ajuste de fullerenos completamente hidrogenados $C_{60}H_{36}$ a la curva típica de extinción UV de Fitzpatrick para el factor de enrojecimiento $R_V = 3.1$. El máximo de absorción está indicado por la línea vertical y se encuentra en 2175 \AA con una sección eficaz correspondiente del orden 6500 Mbarn, aproximadamente diez veces mayor que para C_{60} . Desafortunadamente todavía no se ha encontrado evidencia directa de los fullerenos hidrogenados en el espacio interestelar.

4. EL PAPEL DE LOS FULLERENOS HIDROGENADOS EN LA EMISIÓN ANÓMALA DE MICROONDAS.

Varios experimentos dedicados al estudio de la anisotropía del fondo cósmico de microondas encontraron evidencias, posteriormente confirmadas, de un exceso de emisión de microondas en el rango 10-90 GHz correlacionada a altas latitudes galácticas con la emisión térmica del polvo interestelar (COBE Kogut et al. 1996, Leitch et al. 1997; TENERIFE CMB experiment: de Oliveira-Costa et al. 1999, 2004; Watson et al. 2005; y los resultados del satélite Planck). Una explicación para esta emisión "anómala" de microondas y su correlación con el polvo fue propuesta por Draine & Lazarian (1998a,b) considerando la emisión dipolar eléctrica de moléculas carbonadas con distribución inhomogénea de carga que rotan rápidamente. Estos modelos parecen reproducir las principales características de la llamada emisión anómala de microondas pero no identifica el responsable real de la emisión que probablemente esté relacionado con moléculas a base de carbono como los Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAH) y como los fullerenos hidrogenados que pueden girar más rápido que 10 GHz dependiendo de las condiciones del medio interestelar (ver figura 7, Iglesias-Groth 2005, 2006).

5. EL COMPLEJO MOLECULAR DE PERSEO. OBSERVACIONES Y DETECCIONES DE LOS PAHS MÁS SIMPLES Y DE FULLERENOS

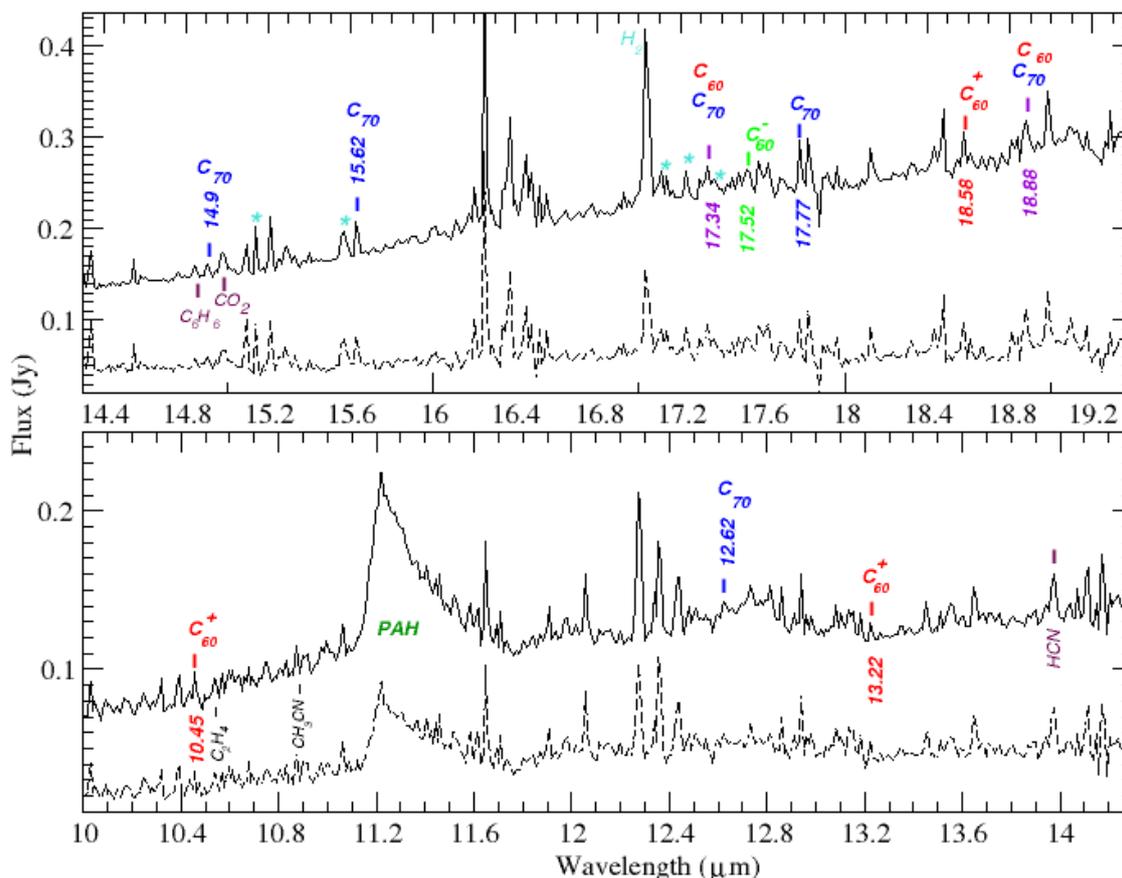
El complejo molecular de Perseo fue la primera región con una detección robusta de Emisión Anómala de Microondas (AME, Watson et al. 2005). La búsqueda de transiciones asociadas a PAHs y a fullerenos en la línea de visión de esta región con emisión anómala de microondas condujo, primeramente, al descubrimiento de los dos PAHs más simples. Usando datos de cuatro telescopios independientes, se detectaron bandas ópticas que pueden ser atribuidas a los cationes del naftaleno y del antraceno (Iglesias-Groth et al. 2008, 2010). Más recientemente se ha logrado la identificación, con datos tomados por el satélite Spitzer de la NASA, de las transiciones vibracionales en emisión en el infrarrojo medio de los fullerenos C_{60} y C_{70} en los espectros de varias estrellas y en espectros obtenidos en varias ubicaciones interestelares distribuidas en la región IC 348, ver figura 8 (Iglesias-Groth, 2019). Esta es una de las regiones de formación estelar más cercanas al Sistema Solar y, por tanto, de las mejor estudiadas. Tiene unos pocos millones de años de edad. En ella existen numerosos discos protoplanetarios en los que muy probablemente están naciendo planetas. La presencia de fullerenos podría incidir en la química de las atmósferas de los planetas en formación.

En IC 348 se detectó, además del C_{60} , el C_{70} que es mucho menos frecuente. Esta detección del C_{70} es la más fiable que se conoce por el número de bandas reconocidas y es la molécula más compleja que se ha visto de forma fiable en el medio interestelar hasta la fecha.

Las bandas de ambos fullerenos aparecen ampliamente distribuidas en esta región y con mayor fuerza en la línea de visión de las estrellas en el núcleo del cúmulo. Este trabajo también aporta la posible detección de formas ionizadas del C_{60} , tanto del catión como del anión, que podrían ser una fracción entre el 20% y el 10%, respectivamente, del total de fullerenos C_{60} en la región.

La estimación de la abundancia de fullerenos resulta ser consistente con las obtenidas en las regiones donde se producen, principalmente, en las nebulosas alrededor de estrellas como el Sol en sus últimas fases evolutivas que, con frecuencia, dan lugar a la nucleosíntesis de grandes cantidades de carbono.

Fig. 8.-Los espectros promediados de Spitzer en el IR medio de tres estrellas (LRL 21, 31 y 67, línea continua) y cuatro ubicaciones interestelares (línea discontinua) en IC 348. El rango espectral es 10-14.3 micras (panel inferior) y 10.4-19.3 micras (panel superior). La ubicación de las bandas de fullerenos y algunas bandas de moléculas orgánicas (Bast et al. 2013) se indica en ambos paneles. Algunas bandas de agua (Blevins et al.2016) están marcadas con asteriscos. El paso en el eje vertical es de 0.01 Jy.



Las abundancias estimadas para el C_{60} hacen posible que sus formas hidrogenadas contribuyan notablemente al AME de la región, pero estas formas hidrogenadas como ya se ha mencionado todavía no han sido descubiertas en el espacio.

Las estrellas estudiadas en IC 348 albergan discos protoplanetarios. Aunque las observaciones muestran con claridad la presencia de fullerenos en el medio interestelar, la resolución espacial de los espectros no es suficiente para establecer la presencia de fullerenos en los discos protoplanetarios. El siguiente paso será usar el futuro y más potente telescopio espacial JWST para establecer cuántos fullerenos hay en los discos de material donde se están formando planetas.

Si las abundancias de fullerenos observadas en la nube fueran representativas para los discos protoplanetarios, el C_{60} , que es el más abundante de las dos especies, podría constituir el 0,1% del carbono total disponible en los discos. Esto debería fomentar su búsqueda en discos jóvenes con instalaciones futuras como el telescopio espacial JWST. Los fullerenos proporcionan una reserva de anillos de carbono pentagonales y hexagonales que podrían llegar a ser importantes como bloques de construcción de las moléculas prebióticas. La acreción de estas moléculas robustas en fases tempranas de los planetas y su posible disgregación podría contribuir a la formación de moléculas orgánicas complejas en planetas jóvenes.

REFERENCIAS

- Bast J. E., Lahuis F., van Dishoeck E. F., Tielens A. G. M., 2013, *A&A*, 551, 118.
- Blevins M., Pontoppidan K. M., Banzatti A., Zhang K., Najita J. R., Carr J.S., Salyk C., Blake G. A., 2016, *ApJ*, 818, 22.
- Becker, L., Bada, J. L., Winans, R. E., & Bunch, T. E. 1994, *Nature*, 372, 507.
- Becker, L., & Bunch, T. E. 1997, *Meteoritics Planet. Sci.*, 32, 479.
- Berné O., Mulas G., Joblin C., 2013, *A&A*, 550, L4.
- Caboc'h, T., Girard, J. C. et al. 1997, 38, 471.
- Cami J., Bernard-Salas J., Peeters E., Malek S. E., 2010, *Science*, 329, 1180.
- Campbell E. K., Holz M., Maier J. P., 2016, *ApJ*, 826, L4.
- Cataldo, F & Iglesias-Groth 2010, "Fullerenes: The Hydrogenated Fullerenes", Springer.
- Draine, B. T. & Lazarian, A. 1998, *ApJ*, 494, L19.
- Draine, B. T. & Lazarian, A. 1998, *ApJ*, 508, 157.
- Iglesias-Groth, Tesis, 2003, "Fisisorción y fotoab-sorción de Fullerenos. Implicaciones Astrofísica". Univ. de La Laguna.
- Fitzpatrick, E. L. 1999, *PASP*, 111, 63.
- Foing & Ehrenfreund, Foing, B. F., & Ehrenfreund, P. 1994, *Nature*, 369, 296.
- Foing, B. H., & Ehrenfreund, P., 1997, *A&A*, 317, L59.
- Gielen y col. 2011 Gielen C., Cami J., Bouwman J., Peeters E., Min. M., 2011, *A&A*, 536, A54.
- García-Hernández et al. 2011, *ApJ*, 737, L30.
- Iglesias-Groth, S., Ruiz, A., Bretón, J., & Gómez Llorente, J. M. 2002, *J.Chem. Phys.*, 116, 10648.
- Iglesias-Groth, S., Ruiz, A., Bretón, J., & Gómez Llorente, 2003, *J. Chem. Phys.*, 118, 7103.
- Iglesias-Groth, S., 2004, *ApJ*, 608, L37.
- Iglesias-Groth, S., 2005, *ApJL*, 632, L25.
- Iglesias-Groth, S., 2006, *MNRAS*, 368, 1925.
- Iglesias-Groth, S., 2007, *ApJ*, 661, L167-170.
- Iglesias-Groth et al. 2008, *ApJ* 685, L55.
- Iglesias-Groth et al. 2010, *MNRAS* 407, 2157.
- Iglesias-Groth, S., Cataldo, F & Manchado, A., 2011, *MNRAS*, 413, 213.
- Iglesias-Groth S. & Esposito M., 2013, *ApJ*, 776, L21.
- Iglesias-Groth, S., 2019, *MNRAS* 489, 1509–1518.
- Kogut, A., Banday, A. J., Bennett, C. L., Górski, K. M., Hinshaw, G., & Reach, W. T. 1996, *ApJ*, 460, 1.
- Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. R., & Smalley, R. E. 1985, *Nature*, 318, 162.
- Leitch et al. 1997 486, L23.
- Oliveira-Costa, A. et al. 1999, *ApJ*, 527, L9.
- Oliveira-Costa, A. et al. 2004, *ApJ*, 606, L89.
- Pizzarello, S., Huang, Y., Becker, L., Poreda, R. J., Nieman, R. A., Cooper, G., & Williams, M. 2001, *Science*, 293, 2236.
- Sellgren K. et al., 2010, *ApJ*, 722, L54.
- Ugarte, D. et al. 1992, *Chem. Phys. Lett*, 198, 596.
- Walker G. A. H., Campbell E. K., Maier J. P., Bohlende D., 2015, *ApJ*, 843, 56.
- Watson, R.A., Rebolo, R., et al. 2005, *ApJ*, 624, L89.

UN UNIVERSO DE TALENTO:

En los campos de la investigación y la divulgación en astronomía se están haciendo cada vez más patentes los beneficios que tiene seguir una estrategia inclusiva para el éxito final de las actividades llevadas a cabo, ya sea durante la realización de una investigación científica como en los eventos de divulgación para el público en general. Puede que los beneficios en la divulgación hayan sido hasta ahora los más visibles, pero también son importantes los que se pueden alcanzar para los investigadores y las investigaciones.



Amelia Ortiz-Gil

Observatori Astronòmic, Universitat de València
amelia.ortiz@uv.es

Enrique Pérez-Montero
Instituto de Astrofísica de Andalucía
epm@iaa.es

Andrés Gálvez
European Space Agency, sede central, París
Andres.Galvez@esa.int

Los beneficios para los investigadores y estudiantes con algún tipo de discapacidad son obvios. No podemos permitirnos el lujo de perder los talentos que tienen ni la creatividad que pueden aportar al modo de trabajar habitual y a la hora de abordar distintos aspectos de una investigación, ya que están abiertos a procedimientos y preguntas que quizás no son los más comunes¹.

Además existe un número creciente de estudios e investigaciones que sostienen que los laboratorios que incluyen personas con alguna discapacidad y/o procedentes de diferentes ambientes culturales, sociales, etc. se ven notablemente beneficiados en los resultados finales de las investigaciones que llevan a cabo^{2,3}.

La visualización de datos en 3D permite avanzar e incluso realizar descubrimientos en diferentes campos de la astronomía⁴), y estas visualizaciones pueden imprimirse como objetos 3D que pueden ser explorados también por astrónomos invidentes. Un claro ejemplo de esto fue el descubrimiento de nuevas estructuras en la nebulosa del Homúnculo de Eta Carinae, cuando los datos en 3D fueron impresos creando un modelo físico en relieve⁵.

Por otro lado, adaptaciones como la sonificación de datos son mucho más que un divertido pasatiempo que engancha siempre al público cuando damos una charla. Jeffrey Hannam (RMIT University), por ejemplo, utiliza las herramientas StarSound y VoxMagellan para sonificar datos y, por ejemplo, encontrar patrones que no resultan claros de forma visual y que, sin embargo, son más evidentes de forma sonora⁶.

En España distintas entidades y grupos trabajan en la elaboración de materiales astronómicos inclusivos. En este artículo vamos a destacar los que se llevan a cabo en las tres instituciones en las que trabajan los autores.

ACTIVIDADES Y MATERIALES ASTRONÓMICOS INCLUSIVOS DEL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE LA UNIVERSIDAD DE VALENCIA

El Año Internacional de la Astronomía 2009 (IYA 2009, ver Russo et al. 2009) fue un año de grandes oportunidades para acercar la astronomía a todo tipo de públicos. También proporcionó a nuestro grupo de divulgadores de la Universidad de Valencia el

LOS BENEFICIOS DE LA ASTRONOMÍA INCLUSIVA

empujón definitivo en la realización de actividades dirigidas a personas con discapacidad física o intelectual. El lema del IYA 2009, "Un Universo para que lo descubras", estaba dirigido a todas las personas del mundo, sin distinción de nacionalidades, razas o creencias. Y también sin distinciones por condición física o intelectual: todos habitamos el mismo universo, bajo el mismo cielo y, por tanto, todos debemos de tener la oportunidad de disfrutarlo, a través de nuestras diferentes sensibilidades y capacidades.

Contamos historias, sentimos, dibujamos, observamos

Cronológicamente, la primera actividad que diseñamos para público con discapacidades cognitivas fue una serie de conferencias interactivas. Así nació "Sensaciones", una charla que relaciona imágenes astronómicas con sensaciones familiares de temperatura, textura, u olores. Asociamos un sentido a cada imagen astronómica presentada: la imagen de la superficie del planeta es contemplada en la pantalla al tiempo que el público toca globos rellenos de agua caliente, o las imágenes de lo son acompañadas por olor de incienso, por ejemplo. Los asistentes establecen así una conexión más personal con aquello que están viendo.

Incluimos también algunas actividades manuales, como la construcción de constelaciones sobre una cartulina negra utilizando estrellas fosforescentes y rotuladores dorados, o la construcción de un sencillo reloj de sol con cartulina (Fig. 1).

"El cielo en tus manos", un espectáculo de planetario para personas ciegas

Es posiblemente un proyecto sorprendente, ya que pensamos que en el planetario se busca principalmente una experiencia visual. Pero el trabajo pionero de Sebastián Musso en Argentina ya había demostrado que era posible y decidimos desarrollar una actividad para el Hemisfèric, el planetario de la Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia (<http://www.cac.es>), accesible a las personas ciegas.

Escribimos un guion original sobre un viaje por las estrellas, visitando diferentes regiones del cielo con constelaciones y objetos famosos. A cada uno de ellos le asociamos un sonido particular en la banda sonora del show. La compañía Àbac Estudiis compuso y grabó la banda sonora en siete canales diferentes para ser emitida por los cinco altavoces repartidos por la cúpula del Hemisfèric más los dos canales de los narradores.

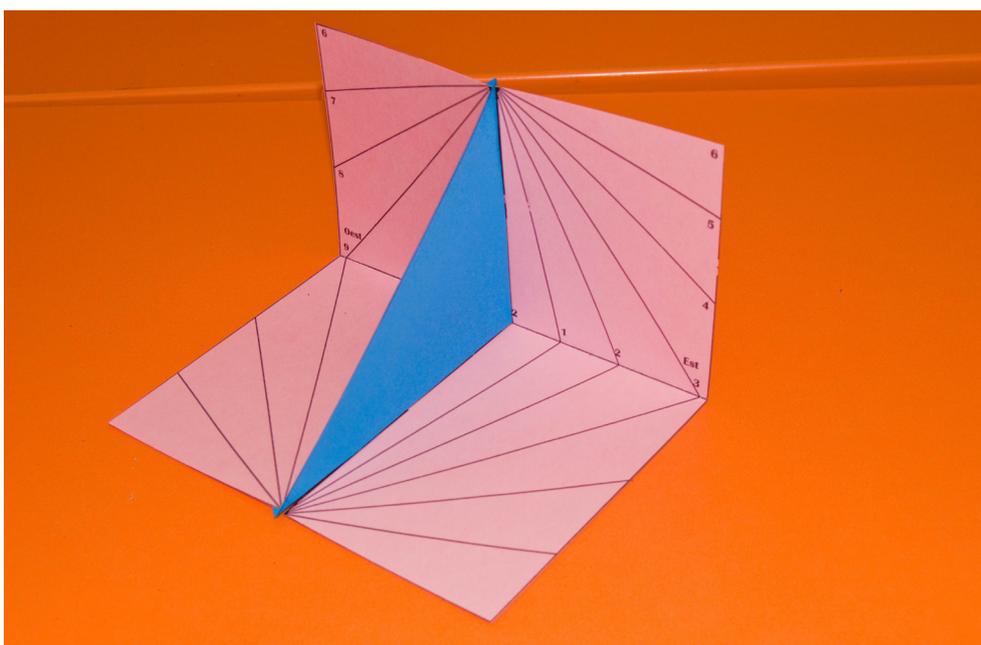


Fig. 1.- Un modelo de reloj de Sol construido en cartulina por los visitantes con discapacidades cognitivas de "L'Aula del Cel". Crédito: OAUV.

La proyección del cielo nocturno en la cúpula se realiza de forma que cuando el narrador habla sobre una constelación en particular, el sonido asociado a ella se escucha procedente del altavoz más cercano al lugar de la cúpula donde está siendo proyectada su imagen, proporcionando así al público, de forma sonora, información sobre las posiciones relativas de los objetos en el "cielo".

De este modo conseguimos saber dónde se encuentra el objeto, pero ¿cómo saber qué aspecto tiene? Para este fin diseñamos una semiesfera realizada con resina y que presenta diferentes elementos en relieve. Unas pequeñas bolas ocupan el lugar de las estrellas, teniendo dos tamaños, según el brillo de la estrella en cuestión. Las líneas continuas dibujan las formas de las constelaciones, y las discontinuas guían al usuario de una constelación a la siguiente, de acuerdo con el guion del show

Para combinar los dos elementos principales, los sonidos y la esfera, la banda sonora dispone de dos narradores diferentes, uno para los contenidos astronómicos y otro para dirigir al público por la semiesfera táctil al ritmo indicado por el guion astronómico.

El espectáculo ha sido representado dos veces en el Hemisfèric, con gran éxito. El público quedó realmente entusiasmado con la experiencia. Algunas personas se emocionaron porque hasta ese momento decían que no habían sido capaces de comprender las descripciones que les habían hecho sobre el cielo, y sentían que por fin lo comprendían bien. Otros recordaron que habían sido capaces en el pasado de ver las estrellas, y el show les trajo recuerdos agradables.

El show ha sido traducido al portugués, inglés, francés y flamenco y ha sido presentado en planetarios de Portugal, Estados Unidos y Bélgica.

Fig. 2.- Un grupo de niños en la exposición Inspiring Stars de la Unión Astronómica Internacional, donde fueron mostrados los planetas táctiles desarrollados por el OAUV. Crédito: OAUV.



"Astroadapt", un software astronómico para personas con problemas de motricidad

Durante nuestras colaboraciones con centros de educación especial, encontramos personas en pleno uso de sus capacidades cognitivas pero con un daño severo del sistema nervioso central que les impedía moverse por sí mismas. Sería éste el caso, por ejemplo, del famoso físico británico Steven Hawking. Se comunican por medio de un ordenador instalado en la silla de ruedas.

Después de identificar sus necesidades hablando con usuarios y cuidadores, nos embarcamos en el desarrollo de un programa en Python de código libre, Astroadapt, bajo licencia Creative Commons Non-Commercial, de características similares a las de los existentes en el mercado, de modo que lo pudieran utilizar tanto para comunicarse como para disfrutar de contenidos astronómicos instalándolo en el ordenador de la silla de ruedas.

"A Touch of the Universe", la colección de materiales táctiles

En 2011 conseguimos financiación de Europlanet y la Fecyt para crear un modelo táctil de la Luna para personas ciegas. A partir del mapa creado por la sonda Clementine de NASA, diseñamos un modelo 3D en el que quisimos representar de forma táctil la imagen visual que tenemos cuando contemplamos la Luna. Se trataba de que los usuarios ciegos tocaran lo mismo que otras personas pueden ver. Esto significa, por ejemplo, que en el modelo los rayos de los cráteres tienen relieve, aunque esto no sea cierto en la realidad. Además, el modelo tiene marcados los dos casquetes polares y dos meridianos que separan la cara visible de la oculta. Una T en relieve en uno de los casquetes indica que se trata del polo norte y el trazo vertical de la T apunta hacia la cara visible para que las personas ciegas puedan orientarse y saber dónde se encuentran. Completamos el modelo pegando letras en Braille hechas con Dymo y que marcaban diferentes accidentes lunares, explicados en un documento en Braille separado, que contiene la correspondencia entre letras y accidentes.

La Luna, los materiales del planetario "El Cielo en tus manos" y otros materiales de astronomía táctil de otros autores los incluimos en un kit de astronomía táctil financiado principalmente por la Oficina de Astronomía para el Desarrollo de la IAU, llamado

"A Touch of the Universe". Este kit fue distribuido entre 30 educadores y divulgadores de la astronomía en países en desarrollo o comunidades desfavorecidas.

El éxito de este proyecto nos animó a seguir desarrollando modelos táctiles de los planetas, usando ahora el software "Mapelia" creado por Jordi Burguet, que permite crear fácilmente modelos táctiles 3D a partir de cualquier mapa 2D completo de un cuerpo esférico. Así hemos diseñado ya Marte, Mercurio y Venus (Fig. 2). En particular, la Oficina de Astronomía para el Desarrollo nos volvió a conceder fondos para la impresión de 20 modelos de Venus, junto con un libro de actividades en Braille e impresión normal, que han sido repartidos de nuevo entre educadores de comunidades desfavorecidas.

En el futuro inmediato seguiremos creando más maquetas planetarias. Todos los modelos y el software Mapelia pueden descargarse de la página web del proyecto⁷ de modo que cualquiera los puede imprimir. Así, el museo de Ciencias Príncipe Felipe de Valencia ha utilizado este modelo de Marte, en la exposición "Marte, a la conquista de un sueño", que puede visitarse actualmente. O la compañía sin ánimo de lucro See3D de Estados Unidos los imprime gratuitamente para las personas ciegas que los solicitan.

ASTROACCESIBLE: UNA INICIATIVA DE DIVULGACIÓN INCLUSIVA EN EL INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA

El proyecto Astroaccesible nació como fruto de las primeras experiencias del Dr Enrique Pérez Montero al afiliarse a la Organización Nacional de Ciegos de España (ONCE) al agravarse la retinosis pigmentaria que padece y ser consciente de las carencias que existían a la hora de enseñar astronomía y explicar que una persona ciega podía seguir dedicándose de manera profesional a la astrofísica trabajando en un centro de investigación de maneja productiva.

Estos primeros contactos se tradujeron en la impartición de varias conferencias en distintos centros de la ONCE que tenían como fin hacer una descripción del lugar de nuestro planeta en el espacio sin estar basadas en el uso de imágenes de manera exclusiva. Como consecuencia de esas primeras interacciones resultaron algunas enseñanzas en la metodología y en los recursos para la divulgación que se pusieron



Fig. 3.- Charla de Enrique Pérez-Montero en el II Congreso Nacional Retina en Murcia. Crédito: Astroaccesible.

en práctica durante el año 2015, en que la Sociedad Española de Astronomía concedió una ayuda para llevar la actividad a otros centros de la ONCE por toda España. En ese momento se comenzó la colaboración con el Observatorio Astronómico de la Universidad de Valencia (OAUV) para usar las primeras maquetas de la Luna y las bóvedas del cielo del hemisferio norte durante la impartición de talleres presenciales llevados a cabo en las propias agencias de la ONCE. Asimismo, con la colaboración de los técnicos de rehabilitación de la ONCE se diseñaron materiales específicos con láminas de termoplástico que permiten representar en relieve conceptos sencillos sobre distancias y tamaños relativos (p.ej. tamaños relativos de la Tierra y la Luna, de los planetas y el Sol, del aspecto de la Vía Láctea).

No obstante, los dos principios básicos que subyacen en una descripción inclusiva se basan en la utilización de las imágenes incluso en presencia de invidentes, ya que la mayoría de ellos presentan algún resto visual y siempre van acompañados de personas sin problemas de vista, y en el uso de la voz para hacer descripciones completas por medio de metáforas de cualquier contenido que se esté explicando. Esto asegura el carácter inclusivo de las actividades de nuestro proyecto y su aplicación a cualquier entorno divulgativo o educativo independientemente de la presencia de personas con problemas de vista y subrayando diversos aspectos de la astronomía que no suelen ser verbalizados en otro tipo de actividades docentes o divulgativas⁷ (Fig. 3).

Durante el año 2016 se consiguió también financiación de la FEcYT para continuar con las actividades presenciales de Astroaccesible en colaboración con la Estación Experimental del Zaidín, un centro del CSIC en Granada dedicado a las ciencias agrarias, para hacer talleres conjuntos de Astronomía y Botánica con los cinco sentidos, demostrando que este enfoque inclusivo es extensible a otras ramas de la ciencia. El proyecto se complementa con la publicación de artículos con un enfoque inclusivo en la página web del proyecto (<http://astroaccesible.iaa.es>) y la creación de una página de facebook para anunciar sus actividades (<http://facebook.astroaccesible.iaa.es>)

Como parte fundamental de las actividades de Astroaccesible en los últimos años está la importante actividad llevada a cabo en centros de enseñanza de todos los niveles incluyendo alumnos con y sin discapacidad. Esta actividad se manifiesta con la colaboración con la Universidad de Granada con la participación en el Aula científica y la Semana de la Ciencia organizadas en la Facultad de Ciencias o en el Campus Inclusivo, o en la participación anual en la Noche Europea de los

Investigadores, la Feria del Libro o el evento Desgranando ciencia en colaboración con el Gabinete de Divulgación del IAA. El ejemplo que supone a muchos estudiantes la presencia de un investigador invitado que explica conceptos de astronomía basándose en explicaciones completas y en el sentido del tacto resulta en un redescubrimiento de la astronomía como una ciencia abstractiva basada en procedimientos de observación complejos que no pueden interpretarse únicamente a través del sentido de la vista.

En los dos últimos años se ha extendido la actividad de Astroaccesible para hacer llegar a grupos de personas con discapacidad a lugares representativos del ámbito científico. Este es el caso de la visita inclusiva al observatorio de Calar Alto en 2017 en colaboración con la empresa AZIMUT y la ONCE para lo que se diseñaron y prepararon materiales específicos sobre la distribución de los telescopios y su funcionamiento, o la visita inclusiva al desierto de Tabernas (Fig. 4) como análogo del planeta Marte, en colaboración con la asociación "Ciencia sin Barreras" y la financiación de la Fundación Zaragoza Ciudad del Conocimiento en 2018.



Fig. 4.- Excursión inclusiva al Desierto de Tabernas. Crédito: Ciencia sin Barreras, Astroaccesible.

En el último año hemos recurrido al uso de sonidos como herramienta alternativa para divulgar procesos astronómicos físicos dinámicos. Además de la gran variedad de recursos sonoros disponibles en la red se ha iniciado una colaboración con el proyecto Cosmonic (<http://rgb.iaa.es/cosmonic>) para el diseño de recursos sonoros y animaciones con carácter divulgativo así como la impartición de conferencias tituladas “Los sonidos del Universo” para divulgar los beneficios de este recurso tanto en el ámbito divulgativo como profesional.

Finalmente, dado que uno de los objetivos de este proyecto es fomentar el inicio de carreras científicas entre otras personas con discapacidad, se ha llevado a cabo una ingente actividad en congresos y reuniones para explicar la compatibilidad de la actividad investigadora y la discapacidad y animando a centros de estudios y universidades a hacer más accesibles todos sus contenidos, algo muy viable en estos días con los recursos tecnológicos de que se disponen. Esta línea de actuación se ve fortalecida con la participación como ponente en el curso de cultura científica organizado por el CSIC. Además se ha iniciado un convenio con el Servicio Bibliográfico de la ONCE (SBO) para aumentar el número y variedad de títulos relacionados con la astronomía en los fondos de dicho servicio, que permite la descarga y lectura de libros para los afiliados a la ONCE a través de un sistema adaptado de lectura por voz.

LA CIENCIA ESPACIAL INCLUSIVA EN LA ESA

Desde su creación en 2016, la Oficina de Diversidad e Inclusión de la Agencia Espacial Europea ha llevado a cabo acciones para mejorar la concienciación y promover una mayor incorporación de personas con discapacidad al mercado laboral y a la investigación en el ámbito del espacio. Estas actividades se iniciaron en un primer momento por el interés de algunos empleados de la Agencia quienes, a través de su experiencia de vivir y trabajar con una discapacidad -visual, motora, o de otro tipo- entendieron la necesidad de concienciar a sus colegas del interés de aprovechar el talento de otras personas que, por su condición física o mental, han tenido más dificultades para acceder a puestos de formación y empleo y demostrar su valía en proyectos espaciales. La ini-

ciativa ha contado desde el primer momento con el apoyo del Director General, Jan Woerner, y del actual Director del Programa Científico, Guenther Hasinger, así como de Álvaro Giménez-Cañete, quien le precedió en dicho cargo. Fue este último quien se ofreció a iniciar actividades piloto en el Centro Europeo de Astronomía Espacial (ESAC), de forma que pudiesen servir de referencia para otros centros de la ESA y para entidades académicas e industriales en el campo de la ciencia y la tecnología espacial.

El objetivo principal de estas actividades está siendo concienciar acerca del potencial que se desaprovecha al no incluir a personas con una discapacidad en programas de especialización y empleo, también en el ámbito espacial. Al mismo tiempo, se trata de demostrar el valor añadido de usar un acercamiento inclusivo en la comunicación sobre las misiones espaciales y sus resultados. En ambos casos, divulgación y formación, se pretende abordar los mismos temas, y con el mismo rigor, independientemente de que estén implicadas personas con o sin discapacidad; se sigue el principio de que la adaptación de los métodos de trabajo no supone tener que renunciar a la excelencia.

En una primera fase las actividades de la ESA se han centrado en la comunicación inclusiva, promoviendo a la implicación de especialistas en ciencia espacial y en otras disciplinas relacionadas, a la vez que divulgar acerca de las misiones espaciales y, en general, del estudio del universo a través de la ciencia. Se pretende fomentar un debate más rico acerca del papel de las personas con discapacidad y más alejado de ideas preconcebidas.

En los últimos tres años, estos “encuentros de científicos con la discapacidad” han incluido conferencias en centros de la ESA durante jornadas de puertas abiertas, por ejemplo, por profesionales de la astronomía y la tecnología espacial que compartieron con los asistentes sus experiencias de ser a la vez astrofísicos y afectados por una distrofia retiniana; o algunas visitas y charlas educativas a grupos de alumnos con una discapacidad intelectual. Más allá de estas iniciativas puntuales, y dentro de las experiencias piloto en ESAC anteriormente mencionadas, la actividad más significativa de divulgación de la ciencia espacial inclusiva ha sido el proyecto denominado SpaceIN⁸.

SpaceIN ha consistido en eventos con charlas, talleres y actividades implicando a especialistas y a personas con o sin discapacidades, en torno a la exploración del Sistema Solar y la búsqueda de vida más allá de nuestro planeta, en gran parte –pero no exclusivamente- haciendo referencia a misiones espaciales recientes. Además, se ha propuesto por primera vez el concepto y se ha implementado la organización del primer “análogo planetario inclusivo” del mundo, y que está en la línea de otros numerosos análogos planetarios, también empleados por la ESA y por la comunidad científica, por ejemplo, para la verificación de vehículos de exploración (como el “rover” Rosalind Franklin de la misión ExoMars en Atacama o Tabernas) o el entrenamiento de astronautas (en los paisajes volcánicos de la isla de Lanzarote, en el

proyecto PANGAEA). Estos “análogos inclusivos de Marte” consisten en excursiones a terrenos que por sus características presentan similitudes con entornos del planeta rojo y que a su vez son adecuados en términos de accesibilidad. Por ejemplo, el terreno elegido se ha utilizado previamente en la divulgación de la geología terrestre con personas invidentes por parte de la asociación Ciencia Sin Barreras.

Las actividades en SpaceIN han sido orientadas a un grupo diverso de personas, incluyendo público y profesionales de la investigación científica con y sin discapacidad visual y/o auditiva. Se han realizado dos eventos de SpaceIN. El primero, en junio de 2017 en ESAC (Fig. 5), cerca de Villanueva de la Cañada, Madrid, con charlas, talleres y una visita a las

Fig. 5.- Evento SpaceIN en ESAC. Crédito: SpaceIN.



instalaciones. Unos meses más tarde se realizó un segundo evento en Toledo, en la sede de la Delegación Territorial de la ONCE en esa ciudad.

Las charlas y talleres versaron sobre la planetología comparativa y la astrobiología. Más concretamente, los temas tratados incluían las diferencias y similitudes entre los planetas terrestres, el papel del agua y su interacción con los minerales, la energía térmica interna y la morfología de cuerpos planetarios, y las implicaciones en el desarrollo biológico y en la investigación en exobiología. Se trataba también de explicar cómo las misiones espaciales pueden aportar respuestas acerca de estos temas.

La excursión a un análogo de Marte tuvo lugar también en noviembre de 2017 en Riba de Santiuste, Guadalajara, en cooperación con las Delegaciones Territoriales de la ONCE de Madrid y de Castilla-La Mancha.

En una segunda etapa, a partir de 2018 se han desarrollado en ESAC actividades de formación en astronomía espacial y ciencia planetaria, en colaboración con la ONCE.

El objetivo es crear una conciencia más participativa e inclusiva en la formación de especialistas en proyectos espaciales, de forma que cualquier persona con la preparación universitaria adecuada pueda completar su trabajo de máster con una estancia de tres a seis meses en ESAC, trabajando en el seno de un equipo encargado de las operaciones científicas de una misión de la ESA en curso o en preparación. Hasta ahora estudiantes con discapacidad visual y/o auditiva han realizado entrevistas visitando las instalaciones de ESAC y conociendo a algunos de sus potenciales supervisores. Los estudiantes seleccionados han pasado seis meses trabajando en el proyecto XMM-Newton, en dos convocatorias distintas en los dos cursos 2017-2018 y 2018-2019. Además, en 2019, el programa ha sido extendido para incluir no sólo a estudiantes de máster, si no también jóvenes graduados que por primera vez pueden acceder a puestos de formación que han sido definidos con una lógica inclusiva, para los que se valorará la competencia, no la condición física en aspectos que no sean relevantes a las tareas que se deben desarrollar.

Se han previsto puestos tanto en los equipos de XMM-Newton como de JUICE, que han sido publicados en noviembre 2019 en la página del programa "Young Graduate Trainee" (YGT) de la ESA. Las entrevistas tendrán lugar en el primer trimestre del 2020, y los contratos de los candidatos o candidatas que tengan éxito en el proceso de selección comenzarán a mediados de año.

A finales de 2019 o principios de 2020 también se ofertarán nuevas plazas para estudiantes de master que quieran "probar" a pasar varios meses en ESAC durante el periodo estival, y a su vez nuevos puestos de "YGT" serán definidos para ser publicados después del verano, completando así el ciclo anual. La conexión entre los dos programas - el de estancias en ESAC de estudiantes de máster y YGT- también facilita la posible incorporación de personas con una formación en un campo distinto al espacio, como por ejemplo ingenierías, física o matemáticas- en dos etapas sucesivas. Esto es importante ya que el número de solicitantes con una discapacidad y con un alto grado de especialización en disciplinas directamente relacionadas con el espacio es todavía relativamente pequeño. El papel de entidades colaboradoras como la ONCE y su Fundación es también clave a la hora de dar difusión a estas oportunidades entre los posibles candidatos y candidatas.

Se espera que este programa tenga un doble beneficio: Por un lado, para las personas participantes en las experiencias de formación, que a través de las mismas mejoren sus perspectivas laborales en el campo de la investigación o en la industria espacial; y por otro, para crear un mayor entendimiento entre sus compañeros y compañeras acerca de la discapacidad, que contribuya a generar nuevas oportunidades laborales para otras personas dentro y fuera de la ESA. Además, estas experiencias deben llevar a un mayor conocimiento por parte de los servicios administrativos y de gestión de los centros de la Agencia acerca de las necesidades reales de accesibilidad, seguridad, adaptación de puestos de trabajo y reglamentación laboral también en el caso de personas con discapacidad, superando estereotipos poco útiles y poco apropiados, especialmente, para una organización que tanto ha sabido aprovechar la diversidad de sus empleados e inspirar con sus logros científicos y tecnológicos a millones de ciudadanos europeos, en misiones como Planck o Rosetta.

SINERGIAS ENTRE PROYECTOS

Uno de los escollos que nos encontramos en el mundo de la divulgación en general y en el de la divulgación inclusiva, en particular, es la ausencia de publicaciones sobre los recursos que se desarrollan y la falta de colaboración entre diferentes grupos de forma que no estemos siempre inventando lo mismo sino que vayamos avanzando y mejorando lo que ya existe, fomentando al mismo tiempo la aparición de ideas nuevas.

Con ánimo de seguir construyendo, hace unos años empezamos una colaboración entre el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA) y el Observatorio Astronómico de la Universidad de Valencia (OAUV) con el objetivo de compartir materiales y experiencias. Fruto de ello han sido algunas de las actividades expuestas anteriormente y el diseño de nuevos materiales, como una semiesfera táctil que reproduce el cielo de verano y que pronto tendremos finalizada. Esta nueva maqueta se realizará con ayuda financiera de la Sociedad Española de Astronomía y tendrá

como fin la realización de actividades de observación al aire libre más inclusivas y que permitan la concienciación del público en general sobre la utilidad de recursos alternativos y complementarios al uso del telescopio o la fotografía.

Los tres equipos del IAA, ESA y OAUV formamos parte de la asociación Ciencia Sin Barreras, que tiene como objetivo eliminar las barreras que encuentran las personas con discapacidad para el acceso a la ciencia. Esta asociación ha promovido la realización de cuatro congresos nacionales que tenían como fin la promoción de estrategias más inclusivas de divulgación y el fomento de la ciencia entre las personas con discapacidad. Además los tres equipos han contribuido, junto con otras instituciones, como el Centro de Astrobiología y la ONCE, al primer evento SpaceIN que tuvo lugar en ESAC en junio de 2017. Los eventos SpaceIN en Toledo y la excursión al terreno análogo de Marte, en Riba de Santiuste, contaron también con la contribución clave del IAA y de la asociación Ciencia Sin Barreras (Fig. 6).



Fig. 6.- Excursión inclusiva al Desierto de Tabernas, un lugar análogo terrestre de Marte. Los visitantes ciegos utilizan modelos en relieve del planeta Marte para comprender su geología. Crédito: Ciencia sin Barreras, Astroaccesible, SpaceIN y OAUV.

SpaceIN es un proyecto inherentemente colaborativo. Los contenidos del primer evento SpaceIN fueron en gran parte propuestos por entidades participantes, además de por la propia ESA, que impulsó y coordinó la organización del evento, proponiendo la temática y brindando el apoyo administrativo, logístico y económico.

Algunos ejemplos de las distintas e innovadoras aportaciones son los siguientes: una cata de aguas de Marte (UCM/Ciencia Sin Barreras) en la que las características y sabor del agua se relacionaron con la mineralogía de distintas regiones marcianas determinada a partir de datos de sondas espaciales, como por ejemplo Mars Express; la sensación térmica del gas sublimado y la forma y textura del hielo agrietado producidas en lunas heladas, relacionándolos con las imágenes y datos obtenidos por misiones como Galileo (y próximamente, JUICE) en Europa, o Cassini en el caso de la superficie y penachos gaseosos de Encélado (CAB/INTA); la detección de exoplanetas con misiones como Kepler, a través de una representación participativa basada en grandes globos esféricos (CAB/INTA); un itinerario táctil por el cielo, ubicando algunos sistemas estelares en los que se han detectado exoplanetas (IAA/CSIC/ AstroAccesible); y, finalmente, otras experiencias en geología planetaria comparativa basadas en modelos táctiles de Venus, Marte y la Tierra (OAUV, UCM, UAM/ Ciencia Sin Barreras, CESAR/ESAC). Un video promocional del evento con explicaciones y entrevistas fue realizado por PDICiencia, un proyecto de divulgación audiovisual desarrollado en gran parte por personas con discapacidad intelectual. Como parte de la visita guiada por el proyecto CESAR de ESAC al campus de ESAC se invitó a personas invidentes a probar el sistema de guiado basado en navegación por satélite y señales acústicas BlindExplorer de la empresa Geko Navsat. del vivero de empresas de la ESA en Madrid. Por otro lado, las actividades de formación de estudiantes de master y jóvenes graduados cuentan todas con el apoyo del servicio de integración laboral de la Delegación Territorial de la ONCE en Madrid, y de la colaboración de otras organizaciones que tratan con personas con baja visión y distrofias de retina, como Begisare, en el País Vasco.

CONCLUSIONES

Las actividades encaminadas a hacer de la astronomía una ciencia más inclusiva tienen beneficios tanto en el ámbito de la divulgación como en el de la investigación.

Las adaptaciones que se pueden realizar para mejorar la comprensión de ciertos conceptos astronómicos, que suelen enseñarse tradicionalmente de manera exclusiva por medio de imágenes, no son solo recomendables porque permiten extender los contenidos a personas que suelen estar excluidas de dichas descripciones visuales sino porque benefician a todo el mundo y transmiten la idea veraz de que todos pueden contribuir al ámbito científico a pesar de las barreras que les impiden relacionarse de manera adecuada con su entorno.

Permitir el acceso a los datos y contenidos astronómicos de forma inclusiva (por ejemplo, a través de diferentes canales sensoriales) beneficia no sólo al público y a los investigadores con discapacidad sino que posibilita una mejor percepción para todos, incluso facilitando en algunos casos la realización de descubrimientos.

Además no podemos permitirnos perder a personas de talento simplemente porque tienen alguna discapacidad y necesitan la eliminación de las barreras que les impiden acceder al conocimiento y realizar su trabajo en igualdad de condiciones que los demás. Gracias a la eliminación de las barreras de comunicación, por ejemplo, y de otras ayudas, el profesor Stephen Hawking logró ser uno de los astrofísicos más reputados del siglo XX. ¿Cuántos otros habrá que se estén quedando fuera por no tener esas mismas facilidades?

Para terminar, las personas con discapacidades usan otras capacidades que les permiten también abordar los problemas y preguntas desde perspectivas diferentes, con otras estrategias, enriqueciendo el proceso de investigación y contribuyendo positivamente a su éxito final. Por tanto, permitirles el acceso al mundo de la investigación no es solo un deber moral sino también un paso decidido hacia la excelencia.

REFERENCIAS

- ¹ Phillips, K.W. (2014) How Diversity Works, Scientific American 311, 4, 42-47 (October 2014)
doi:10.1038/scientificamerican1014-42.
- ² Powell, K. (2018). These labs are remarkably diverse - here's why they are winning at science, Nature 558, 19-22 (2018), doi: 10.1038/d41586-018-05316-5.
- ³ Guterl, F. (2014) Diversity in Science: Why It Is Essential for Excellence, Scientific American, 311, 4,38-40 (October 2014) doi:10.1038/scientificamerican1014-38.
- ⁴ Faherty, J.K. (2019) IDEAS: Immersive Dome Experiences for Accelerating Science, <https://arxiv.org/pdf/1907.05383.pdf>.
- ⁵ Steffen, W. et al. (2014) The three-dimensional structure of the Eta Carinae Homunculus, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 442, Issue 4, Pp. 3316-3328.
- ⁶ Hannam, J. (2019) Enhancing Accessibility through Sonification and Sound Technologies, an IAU Symposium 358, <https://iau-oao.nao.ac.jp/iaus358/talk-session-5-5/>.
- ⁷ Pérez-Montero, E. 2019. Towards a more inclusive outreach. Nature Astronomy, vol. 3, pp 114-115. DOI: enlace 10.1038/s41550-019-0693-3 6 de 8.
- ⁸ Galvez, A.; Ballesteros, F.; García-Frank, A.; Gil, S.; Gil-Ortiz, A.; Gómez-Heras, M.; Martínez-Frías, J.; Parro, L. M.; Parro, V.; Pérez-Montero, E.; Raposo, V.; Vaquerizo, J. A. 2017. EPSC, 11, 905G.

COMET INTERCEPTOR:

Hace tan solo 35 años, la naturaleza de los cometas era sólo una hipótesis. Entonces, científicos e ingenieros, con el esfuerzo y dedicación que requieren las misiones espaciales, se encontraban comprometidos con el éxito de la primera misión de espacio profundo de la Agencia Espacial Europea (ESA), la misión Giotto al cometa Halley. Era el año 1986 y recién obtenida la imagen del núcleo del cometa más famoso de la historia, ya se empezaba a trabajar en la siguiente misión para explorar otro cometa: la misión Rosetta (ESA). Y de nuevo se repite la historia, apenas terminada esa misión, ya se ha empezado a trabajar en la siguiente: *Comet Interceptor*. Pero, ¿por qué plantear una nueva misión a un cometa?



Luisa Lara
lara@iaa.es

Pedro J. Gutiérrez
pedroj@iaa.es

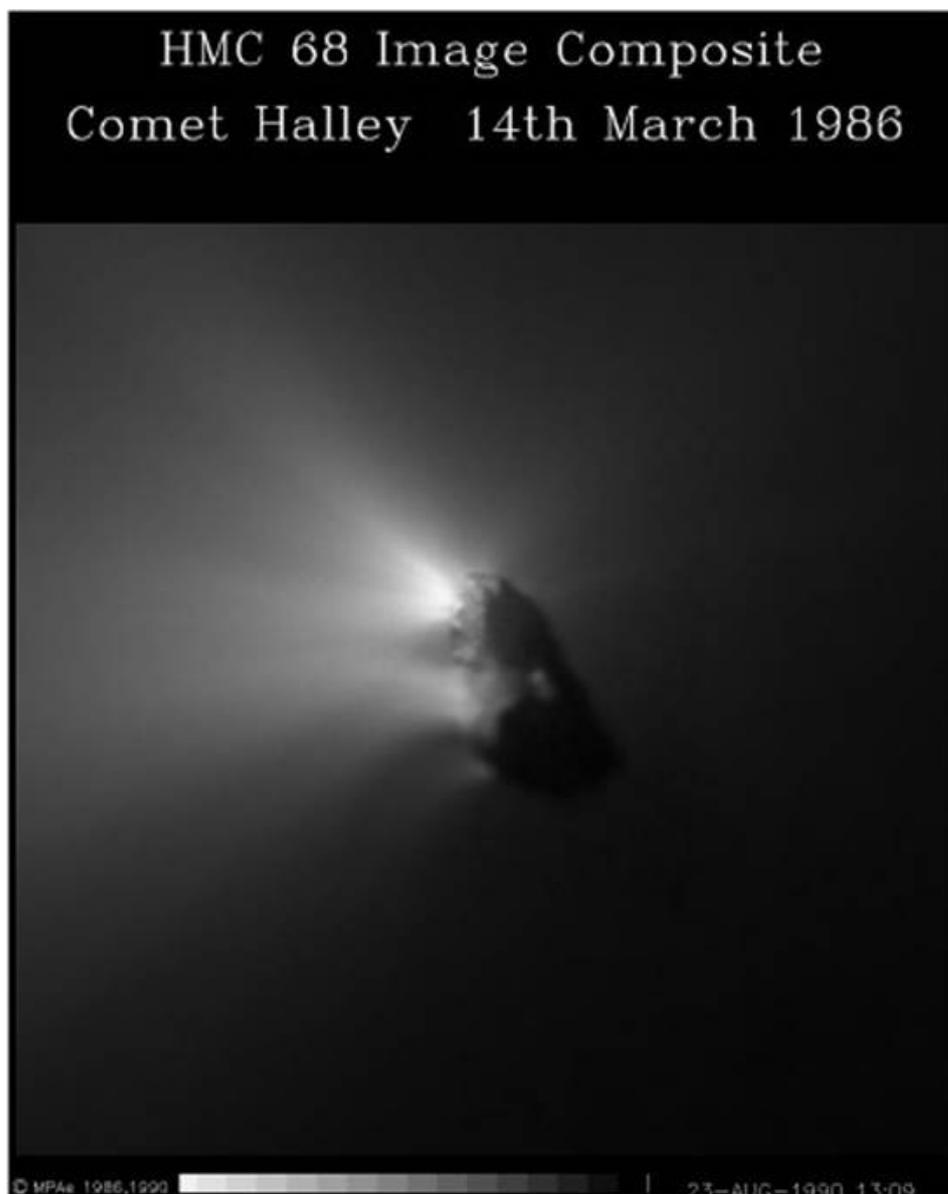
Instituto de Astrofísica de Andalucía

Con la ingenuidad de un niño, algunos de los científicos que nos dedicamos a la investigación del Sistema Solar, estamos permanentemente convencidos de que es ahora cuando empezamos a comprender cómo se formó y evolucionó nuestro sistema planetario. Así, sin darnos cuenta de la contradicción, aunque casi cada dato nos muestra que nuestro trabajo tiene algo de sisífico.

Pero es que no es para menos. En nuestro Sistema Solar sabemos que tenemos los planetas (ayer 9 y hoy 8), planetas que no son planetas, asteroides, cometas, cometas que son asteroides y al contrario, etc. Todo eso tiene su interés, el clasificar nos permite después desdibujar los límites aunque para lo primero ya necesitemos hasta la inteligencia artificial porque la nuestra no llega. Los números naturales son fáciles, pero no podemos olvidar que son un subconjunto de los reales y esos dan vértigo. Pues lo mismo con el Sistema Solar. Uno de los problemas a resolver es el tiempo, la secuencia temporal en la que los distintos procesos iban ocurriendo. El modelo que describe la formación del Sistema Solar debe tener en cuenta que Júpiter se debió formar muy rápido para acretar suficiente gas antes de que éste se dispersase pero no tanto como para impedir la circulación a gran escala que nos indican las muestras de polvo del cometa Wild 2 traídas por la sonda Stardust de la NASA. Esa circulación a gran escala también es necesaria para explicar la dispersión de razones deuterio/hidrógeno medidas en los cometas, agua que intercambié deuterio en las inmediaciones del Sol debió ser transportada más allá de Neptuno para provocar un decrecimiento de la razón D/H en la región transneptuniana. Después de unos cuantos Maños, el disco se limpia y una fase de relativa tranquilidad comienza. Las migraciones planetarias y la interacción gravitatoria de todo el sistema entran en acción y, al menos 450 Maños después, por la entrada en resonancia de Júpiter y Saturno, un período de inestabilidad comienza, produciendo el famoso Bombardeo Intenso Tardío que lanzó objetos helados hacia la parte interna del Sistema Solar a la vez que, en la parte externa, se generaban las distintas reservas de cometas. Los cometas transneptunianos forman el disco disperso, de donde proceden los cometas de corto período (como el 67P/Churyumov-Gerasimenko, objetivo de la misión Rosetta). Los cometas entre Saturno y Neptuno son desterrados a la nube de Oort, de donde proceden

LA CAZA ESPACIAL DE UN COMETA

Núcleo del cometa Halley visto por la cámara multicolor HMC de Giotto (ESA).
Fuente: <https://sci.esa.int/web/giotto/-/51183-the-nucleus-of-comet-halley>.
Copyright: ESA/MPS



los cometas nuevos, aquellos que se han mantenido alejados del perturbador entorno de la región planetaria. Parece ser que para seguir esa línea temporal nuestro Sistema Solar tuvo que contar con la magia de las inestabilidades gravitacionales, la de la formación del Universo pero aplicada a nuestra escala. Pequeñas irregularidades en la distribución de materia que se acumulan por atracción gravitatoria mutua y crecen rápidamente, desacoplándose del gas que las rodea. Por enésima vez consecutiva (¡estamos en racha!) habíamos conseguido superar la barrera del

metro, esa que nos dice que nuestro Sistema Solar no debe existir porque cuando los cuerpos alcanzan ese tamaño o se rompen o migran hacia el Sol. Y en esta ocasión lo habíamos hecho teniendo en cuenta el exigible rápido crecimiento de Júpiter, los distintos tipos de migraciones que vamos descubriendo (primero hacia la estrella y luego hacia fuera) y, además, explicábamos algunas de las anomalías, rarezas, del sistema solar externo, la existencia de algunos de esos objetos singulares con órbitas raras de verdad. Lo demás parece cuestión de pulir.

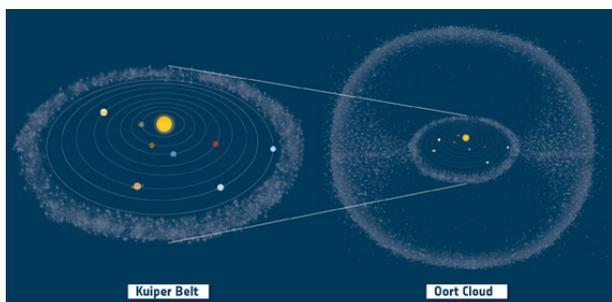


Ilustración mostrando la nube de Oort (derecha) y el cinturón de Kuiper (izquierda).
https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/ESA_s_new_mission_to_intercept_a_comet

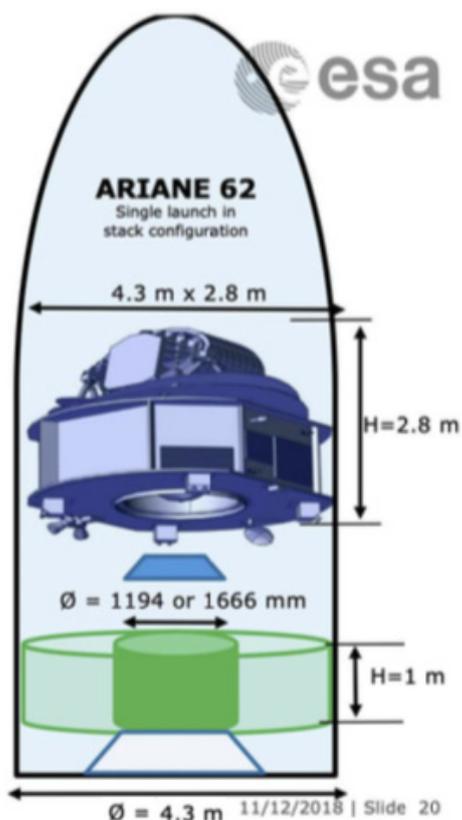


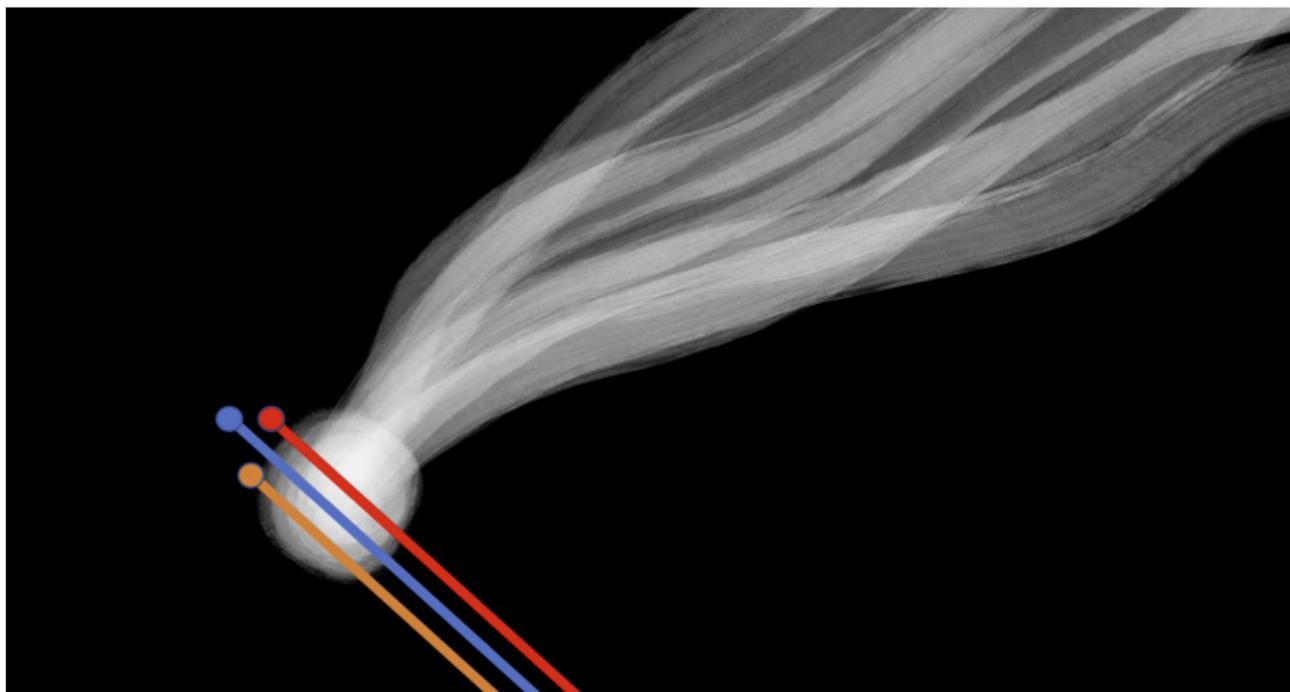
Imagen con intención ilustrativa del alojamiento de CI (abajo) y Ariel (arriba) en el cohete Ariane 6. La disposición final de las sondas puede ser diferente. Consorcio *Comet Interceptor*. PI. Geraint Jones, University College London, UK.
 Fuente: <http://www.cometinterceptor.space>

Sin embargo, una dificultad que se nos plantea con esta descripción es que más allá de Neptuno, según lo que pensamos, algunos cuerpos (con tamaño del orden del de Plutón) también tuvieron que crecer muy rápido. Casi se puede decir que nacieron así, gorditos. Eso desató una dispersión de velocidades en los cuerpos de esa zona que debió dejar la región transneptuniana hecha unos zorros hasta que la gravedad y la presión de radiación pusieron algo de orden.

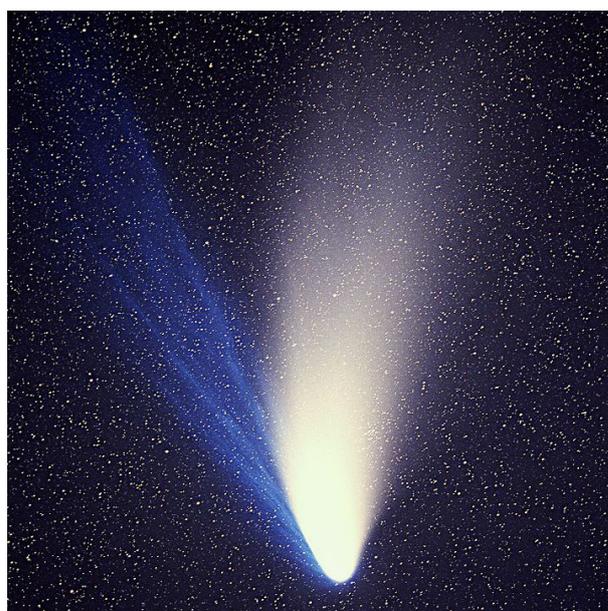
Rosetta nos ha confirmado que los cometas, al menos el 67P/Churyumov-Gerasimenko, son cuerpos frágiles, muy porosos, con un alto contenido en volátiles y que no han sufrido ni colisiones catastróficas ni compactación. Es decir, los cometas han sabido esquivar los efectos de un entorno colisional y destructivo. Pero no sólo eso, de alguna manera evitaron sufrir el presumible calentamiento radiogénico que ha afectado a los cuerpos más grandes. Es decir, los cometas son unos supervivientes, que nos hacen pensar más en la teoría de la evolución y en el principio antrópico que en la ecuación de Smoluchowski y en la física del acrecimiento. Siempre se pueden lanzar hipótesis plausibles pero difíciles de demostrar: buscar otros emplazamientos de origen para los cometas o aceptar que los cometas se formaron más tarde que los principales cuerpos del Sistema Solar serían ejemplos. En todo ello jugaría un papel fundamental un dato que aún no tenemos: ¿cuánta masa había inicialmente en la región transneptuniana? Si nos pasamos, los cometas como los conocemos no deben existir, si nos quedamos cortos, a lo mejor perdemos cuerpos como Sedna o el mismo Plutón. En cualquier caso parece que, según lo que conocemos, la existencia de cometas, con sus características, es casi un milagro. Pero eso suena raro. Como objetos menos evolucionados del Sistema Solar, estamos convencidos que tienen información clave, más allá del ajuste de unos parámetros, para describir su propia formación y su relación con la formación del Sistema Solar de manera algo menos... artificial.

La mayoría de la información que tenemos de los cometas procede de los cometas de corto período y, principalmente, de los cometas de la familia de Júpiter, los que tienen un periodo alrededor de los 6 años. Esto es lógico porque son los más accesibles observacionalmente y los que permiten planificar mejor una misión espacial. Pero esos cometas han

Imagen ilustrativa del concepto de la misión *Comet Interceptor*. <http://www.cometinterceptor.space/>. Consorcio *Comet Interceptor*. Pl. Geraint Jones, University College London, UK.

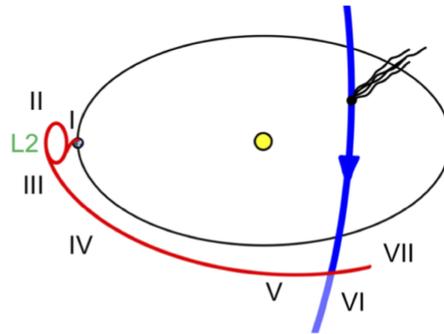


pasado muchas veces alrededor del Sol, están muy evolucionados. Para extraer datos sobre su interior, la información relevante sobre su formación, es necesario restar los efectos que el envejecimiento les ha producido (migración de los frentes de volátiles hacia el interior, formación de manto refractario en la superficie, etc.), efectos que Rosetta nos ha revelado como mucho más complejos de lo que inicialmente pensábamos. En la evolución del conocimiento cometaario algunos pasos importantes se han dado con el estudio de los cometas nuevos, aquellos que visitan el Sistema Solar interno por primera vez, como ocurrió con el Hale-Bopp, que nos permitió triplicar el inventario de moléculas cometaarias con su visita. Desde el punto de vista del investigador en cometas, lo ideal sería poder explorar uno de esos cometas nuevos con una sonda espacial. Una posibilidad para poder explorar in-situ un cometa nuevo es descubrirlo con la suficiente antelación para construir la sonda y poder dirigirla a su encuentro. Hace relativamente pocos años, esa posibilidad era inviable porque normalmente los cometas nuevos se descubrían



Comet Hale-Bopp. Fuente: By E. Kolmhofer, H. Raab; Johannes-Kepler-Observatory, Linz, Austria (<http://www.sternwarte.at>) - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6756556>.

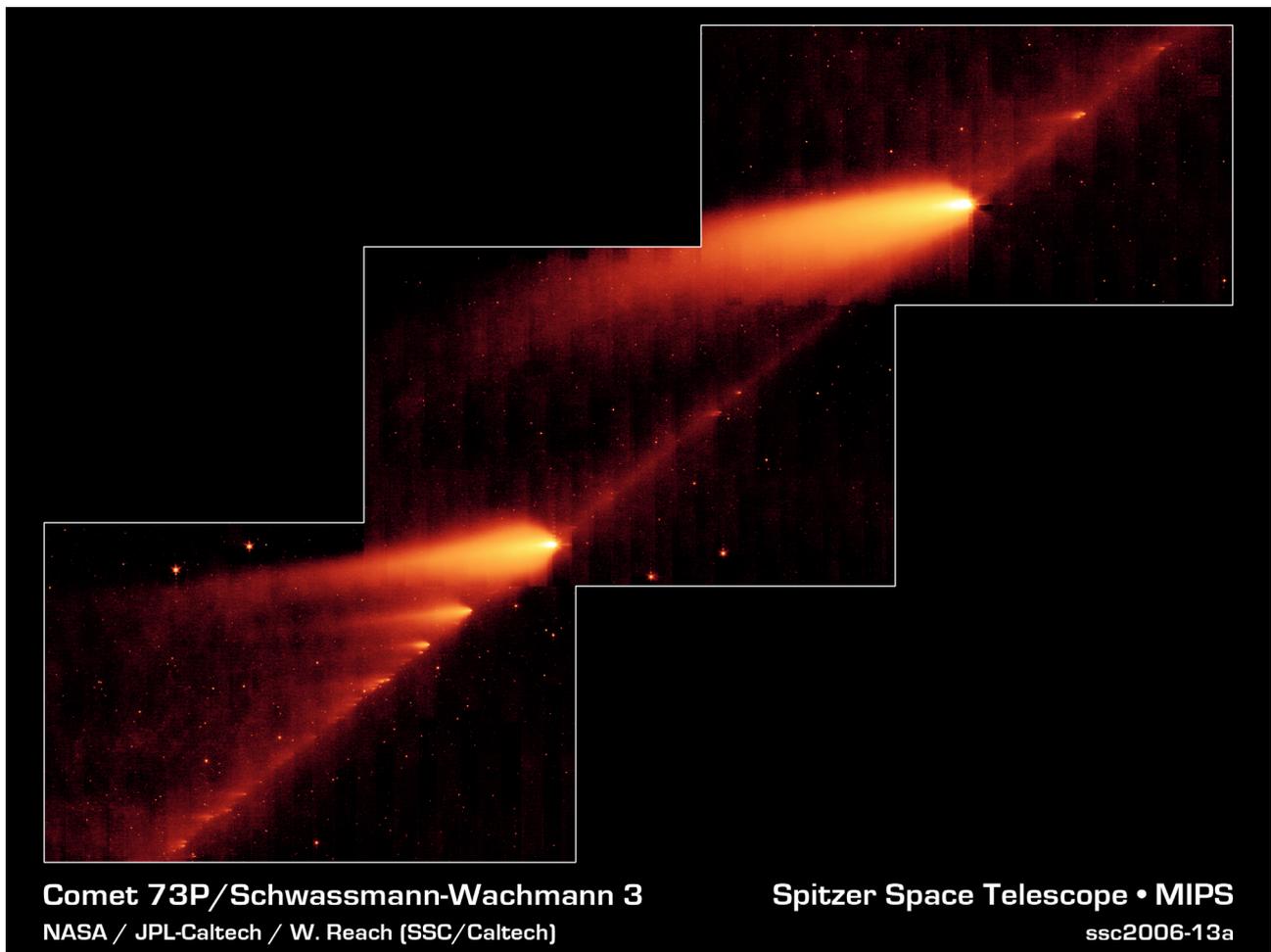
- I. Lanzamiento y llegada a L2
- II. Estacionamiento en L2
- III. Salida desde L2
- IV. Viaje y pruebas de instrumentos.



- V. Separación de las minisondas
- VI. Encuentro
- VII. Envío de datos y estudio del viento solar, si es posible.

Fases de la misión CI. Figura adaptada de la propuesta *Comet Interceptor*. Consorcio *Comet Interceptor*. PI. Geraint Jones, University College London, UK.

Imagen infrarroja del telescopio espacial Spitzer de la NASA mostrando el roto cometa 73P / Schwassman-Wachmann 3, que comenzó a separarse en 1995 durante uno de sus viajes alrededor del sol. Desde entonces, el cometa ha seguido desintegrándose en docenas de fragmentos, al menos 36 de los cuales pueden verse aquí.



Comet 73P/Schwassmann-Wachmann 3
NASA / JPL-Caltech / W. Reach (SSC/Caltech)

Spitzer Space Telescope • MIPS
ssc2006-13a

cuando estaban a 1 año de su perihelio, poco tiempo. Ahora la situación es mejor y algunos se descubren cuando están a más de 10 UA del Sol, es decir, varios años antes de que sus órbitas los acerquen hasta nosotros. La estimación actual es que se pueden detectar unos 3 ó 4 cometas a esa distancia por año, aunque no necesariamente sabremos si son nuevos hasta que se determine con exactitud su órbita. Posiblemente la situación mejore aún más con la puesta en funcionamiento del LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*), que nos permitirá la detección temprana de esos cometas cuando se encuentren todavía a una gran distancia de nuestra órbita. Otra posibilidad para poder explorar in-situ un cometa nuevo es construir la sonda y esperar a que aparezca. La ESA y ARIEL nos han ofrecido esa oportunidad.

En Julio del 2018, la ESA lanzó una llamada de oportunidad para una misión Fast (en atención a la planificación, que debía ser rápida), una sonda de tamaño modesto, para ser lanzada hacia el punto lagrangiano L2 como compañera de ARIEL, cuyo lanzamiento está previsto para 2028. Así se gestó *Comet Interceptor*, una propuesta liderada por el Prof. Geraint Jones (*University College London, UK*) y el Dr. Colin Snodgrass (*U. Edinburgh, UK*) con la colaboración de un gran número de investigadores. Se pensó en diseñar y construir un sistema multisonda que esperase en L2 la llegada de un cometa nuevo al que dirigirse. Al esperar en el punto lagrangiano, el consumo de combustible sería mínimo. El hecho de que la sonda espere en L2 tiene también la ventaja de que sus objetivos no dependen de la fecha de lanzamiento y no se vean afectados por posibles retrasos. Cuando un cometa nuevo se descubra, la sonda abandonará L2 para encontrarse con el cometa cuando éste esté a una distancia aproximada de 1 UA del Sol, con un período de viaje de unos 2-3 años. En su viaje hacia el cometa, se liberarán dos minisondas. La sonda principal seguirá una trayectoria diseñada para realizar un sobrevuelo seguro, a varios miles de km del núcleo, mientras que las dos minisondas seguirán distintas trayectorias, atravesando la coma para acercarse considerablemente al núcleo. Los momentos de separación serán definidos en función de distintos parámetros, incluyendo la actividad que desarrolle el cometa y las distancias de separación deseadas de los tres elementos entre sí y con respecto al núcleo. Esta exploración multipunto nos garantiza

obtener información de la estructura tridimensional de la coma y el núcleo del cometa aún realizando un simple sobrevuelo, discriminando efectos espaciales y temporales. La sonda principal, además de realizar sus propias observaciones, recogerá los datos de las minisondas que quedarán almacenados hasta que sea posible y seguro transmitirlos hacia la Tierra. Después del encuentro con el cometa, si es posible, se planea continuar realizando observaciones del viento solar, durante un tiempo limitado, aprovechando la capacidad multipunto de la misión. Esta planificación tiene una importante ventaja. El hecho de “arriesgar” con observaciones cercanas la integridad de las minisondas no implica perder los datos y su contenido científico, ya que estos se transmitirán a la sonda principal, en trayectoria segura.

Aunque la visita de un cometa nuevo que explorar con *Comet Interceptor* está estadísticamente garantizada, la propuesta incluye otras dos posibilidades de respaldo. La primera alternativa sería la exploración de algún objeto interestelar que nos visite, como los recientes Oumuamua y Borisov, algo cuyo interés científico es evidente y que constituiría una oportunidad única de estudio. La segunda opción de respaldo sería la exploración de un cometa de la familia de Jupiter. Aunque aún no está definido, actualmente se baraja la posibilidad de considerar al cometa 73P/Schwassmann-Wachmann 3 como objetivo de respaldo en el caso de que, por algún motivo, *Comet Interceptor* no pueda dirigirse a un cometa nuevo. 73P es un cometa singular puesto que se puede considerar un cuerpo en desintegración. En su paso orbital de 1995, el núcleo original se fragmentó, al menos, en tres partes, aunque posteriormente se han identificado más fragmentos. Actualmente hay identificados más de 60 fragmentos. Si sobrevive, la exploración de ese cometa nos ofrecería la posibilidad única de “acceder” al interior de un núcleo cometario.

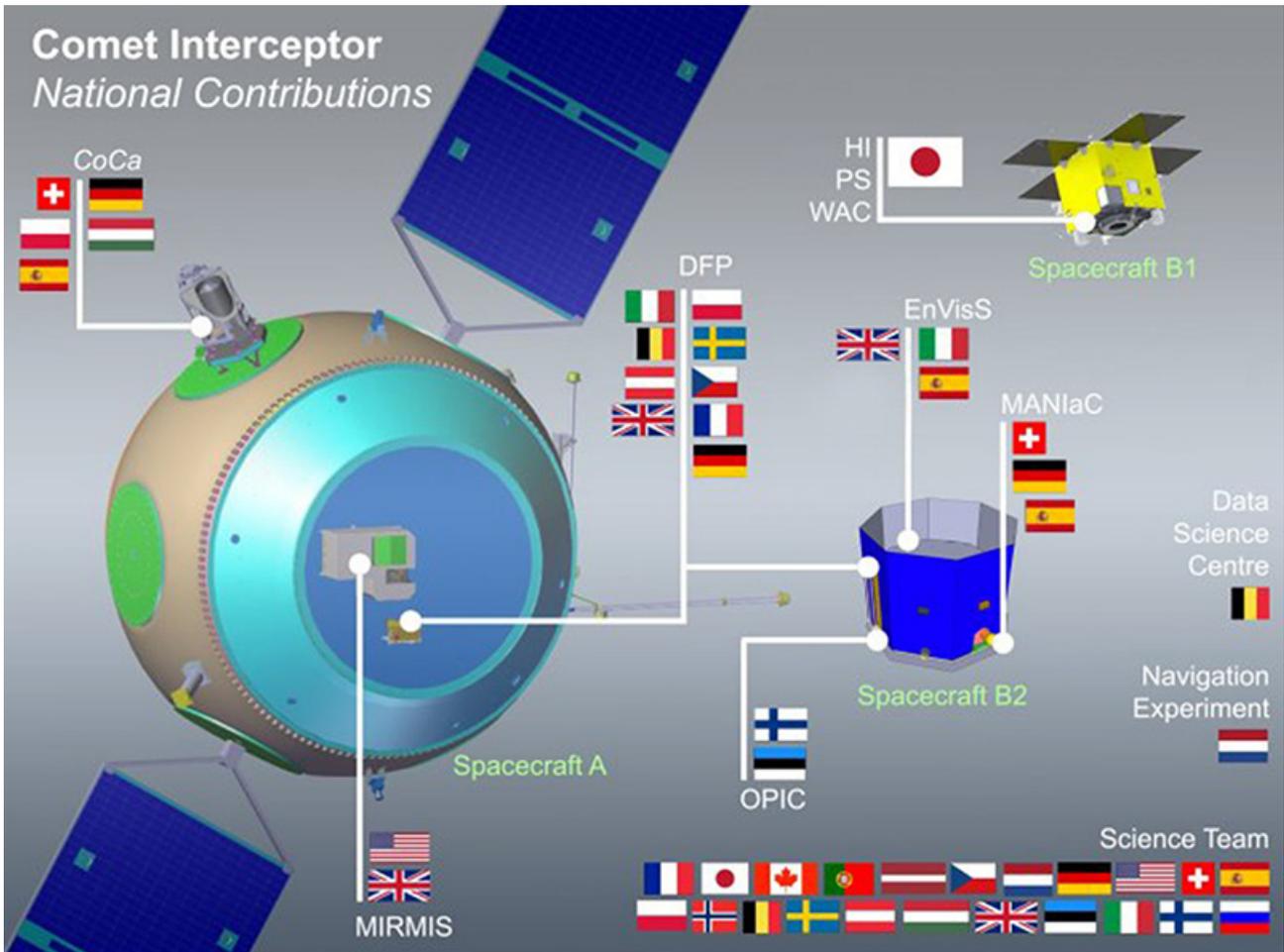
Los principales desafíos de *Comet Interceptor* son 3. Primero, la misión tiene que diseñarse para encontrar cometas en un amplio intervalo de trayectorias y velocidades posibles. El peor escenario sería un cometa en órbita retrograda, que supondría velocidades de sobrevuelo superiores a los 70 km/s. Ello se tiene que tener en cuenta considerando que la masa total, incluyendo combustible, es ya de 650 kg. Segundo, la misión debe llevarse a cabo en un tiempo inferior a los

5 años. Para completar la misión en 5 años, sería necesario que el objetivo se descubriese, a más tardar, 2 ó 3 años después de su llegada al punto L2. Actualmente hay tiempo suficiente considerando la tasa de descubrimientos actuales de cometas nuevos y las distancias a las que los detectamos. El tercero, obviamente, es mantener los costes bajos. La contribución de la ESA, excluyendo el lanzador que sale “gratis” al compartirse el lanzamiento con ARIEL, es de 150 M€. Para reducir costes, las minisondas viajarían en “caída libre”, aunque estabilizadas por giro, no contarían con sistemas de control orbital, seguirán sus propias órbitas keplerianas. Con respecto a la instrumentación, para asegurar una implementación de ésta en el plazo récord de máximo 6 años (los modelos de vuelo han

de estar listos a finales del 2025 o principios del 2026) se propuso hacer uso de conceptos de instrumentos con alto nivel de disponibilidad tecnológica (TRL entre 5 –validado en entorno relevante– y 9 –sistema probado en vuelo en operaciones exitosas), incluyendo herencia de tecnología probada.

En Junio de 2019, *Comet Interceptor* fue seleccionada por ESA como su primera misión tipo F, confirmando la participación de JAXA, la agencia espacial japonesa, en la construcción de una de las minisondas. Actualmente se trabaja en el análisis de las necesidades concurrentes de la misión y en su definición consistente, incluyendo la instrumentación y las cooperaciones necesarias.

Contribuciones iniciales a la instrumentación de *Comet Interceptor* y su alojamiento en cada una de las naves A, B1 y B2. La distribución final puede diferir de lo mostrado. Fuente: Adaptada de <http://www.cometinterceptor.space/> Consorcio *Comet Interceptor*. Pl. Geraint Jones, University College London, UK.



La instrumentación de la misión, como es habitual, correrá a cargo de los países miembros y agencias colaboradoras formando un consorcio que, actualmente, aglutina a 17 países. Aún en valoración, *Comet Interceptor* contará con 9 instrumentos. La sonda principal irá equipada con CoCa (*Comet Camera*), una cámara visible/infrarrojo cercano para obtener imágenes de alta resolución del núcleo del cometa en distintas longitudes de onda; con MIRMIS (*Multispectral InfraRed Molecular and Ices Sensor*), un espectrógrafo infrarrojo cercano/térmico para medir la emisión térmica del núcleo y estudiar la composición molecular de la coma; con DFP (*Dust, Field and Plasma*), un instrumento con sensores de polvo, plasma y campos y con MANIaC (*Mass Analyzer for Neutrals and Ions at Comets*) un espectrómetro de masas. La minisonda proporcionada por JAXA contará con HI (*Hydrogen Imager*), una cámara para el ultravioleta lejano; con PS (*Plasma Suite*), un instrumento para analizar el plasma y con WAC (*Wide Angle Camera*), una cámara visible de campo ancho. La otra minisonda, proporcionada por ESA, contará con un instrumento similar al DFP de la sonda principal; con EnVisS (*Entire Visible Sky coma mapper*) una cámara visible multiespectral con filtros polarimétricos y con OPIC (*Optical Imager for Comets*), una cámara visible/infrarrojo cercano para cartografiar el núcleo y los chorros de polvo a diferentes longitudes de onda. En la actual propuesta, España, a través del Instituto de Astrofísica de Andalucía-CSIC, estaría participando en el diseño de cuatro de esos instrumentos: CoCa, MANIaC, EnVisS y OPIC, aportando subsistemas como la fuente de alimentación y la unidad de procesamiento de datos. El grupo español, liderado por la Dra. Luisa M^a Lara, estaría integrado por José M^a Castro, Miguel Herranz, Jaime Jiménez, Ignacio Martínez y Julio Rodrigo como equipo técnico y por Daniel Guirado, Pedro Gutiérrez, Olga Muñoz, Fernando Moreno y Luisa Lara, como equipo científico.

Esperemos que esta misión continúe su camino y alcance el objetivo de explorar *in situ* un cometa verdaderamente prístino, lo que ayudará a entender la diversidad entre los cometas. En ello estamos.



Logo preliminar de la misión. Consorcio *Comet Interceptor*. Pl. Geraint Jones, University College London, UK.

El primer grado cuadrado de J-PAS, llamado miniJPAS, demuestra a día de hoy el potencial de un cartografiado que proporciona foto-espectros de resolución $R \sim 60$ para todos los objetos detectados, y que contiene una enorme proyección científica en campos tan variados de la astrofísica como la Cosmología, el nacimiento y crecimiento de los agujeros negros super-masivos, la Formación y Evolución de Galaxias, el estudio de la Vía Láctea, o la historia de la formación y evolución del Sistema Solar.



Carlos Hernández Monteagudo
Centro de Estudios de Física
del Cosmos de Aragón (CEFCA)
chm@cefca.es

El nicho de los cartografiados espectro-fotométricos en el OAJ.

Antes de la primera detección de ondas gravitatorias, la principal fuente de información de cualquier objeto celeste accesible desde la Tierra era (y sigue siendo) la caracterización de su espectro electromagnético, esto es, la cantidad de energía emitida por la fuente a cada frecuencia o longitud de onda. Desde hace un siglo aproximadamente, el espectro se entiende como una auténtica huella dactilar de cada fuente, proporcionando información valiosa sobre los fenómenos de emisión en la misma, sobre los elementos y moléculas presentes en la misma fuente y a lo largo de su línea de visión, que, por medio de los patrones de emisión y absorción observados, dan cuenta de la física interviniente, y hasta de la distancia cosmológica que nos separa del objeto (gracias al desplazamiento al rojo causado por la expansión del universo).

Sin embargo, obtener espectros ha sido tradicionalmente un proceso caro y delicado, que implicaba largos tiempos de integración, una pre-selección de fuentes para estudiar, y una sistemática específica asociada a la instrumentación requerida en el proceso de adquisición de espectros.

El Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ) en la provincia de Teruel lidera un nicho alternativo para la obtención masiva y robusta de espectros de baja resolución en el óptico. Con dos telescopios de gran campo de visión (>2 grados cuadrados), el OAJ cuenta con cámaras de gran campo que acoplan un alto número de filtros estrechos (de ~ 140 nm de anchura). La combinación de imágenes para cada uno de esos filtros proporciona un foto-espectro o espectro de baja resolución ($R \sim 10 - 60$) para cada píxel observado, de carácter absolutamente indiscriminado para todo tipo de fuente detectada.

En la actualidad, el OAJ cuenta con dos cámaras, T80Cam y JPCam, que soportan 12 y 60 filtros ópticos respectivamente, y que se acoplan a los telescopios de gran campo JAST/T80 y JST/T250.

La colaboración J-PAS y sus casos científicos.

La colaboración *Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey* (J-PAS) hace uso del telescopio JST/T250 y de JPCam para proporcionar imágenes en ~ 60 bandas diferentes en píxeles

de unos 0.22" de lado, en un área aproximada de unos 8500 grados cuadrados del cielo extragaláctico accesible desde Javalambre.

La motivación inicial de este cartografiado fue la medición precisa de las oscilaciones acústicas bariónicas que se reflejan en la distribución espacial de la materia, y en particular de las galaxias. Las oscilaciones acústicas bariónicas se generan en el universo primitivo, cuando el universo es mil millones de veces más denso que en la actualidad, mil veces más caliente, y la materia (totalmente ionizada) y la radiación están totalmente acopladas por medio de la difusión Thomson. En ese universo joven, las zonas sobre-densas crean ondas acústicas de plasma y radiación que se propagan mientras la difusión Thomson acople eficientemente estos dos componentes: esto ocurre hasta el momento en que los electrones desaparecen del medio al recombinarse con los protones y forman hidrógeno neutro. Es pues esta época de recombinación cosmológica la que marca la distancia recorrida por las ondas de sonido, distancia que se conoce como el *horizonte de sonido*. Esta distancia, cercana a los 150 Mpc, indica la posición de la onda de sonido que propagaba un exceso de materia y radiación, y ha sido medida con gran precisión por experimentos sensibles a la Radiación de Fondo Cósmica de Microondas (como WMAP o Planck).

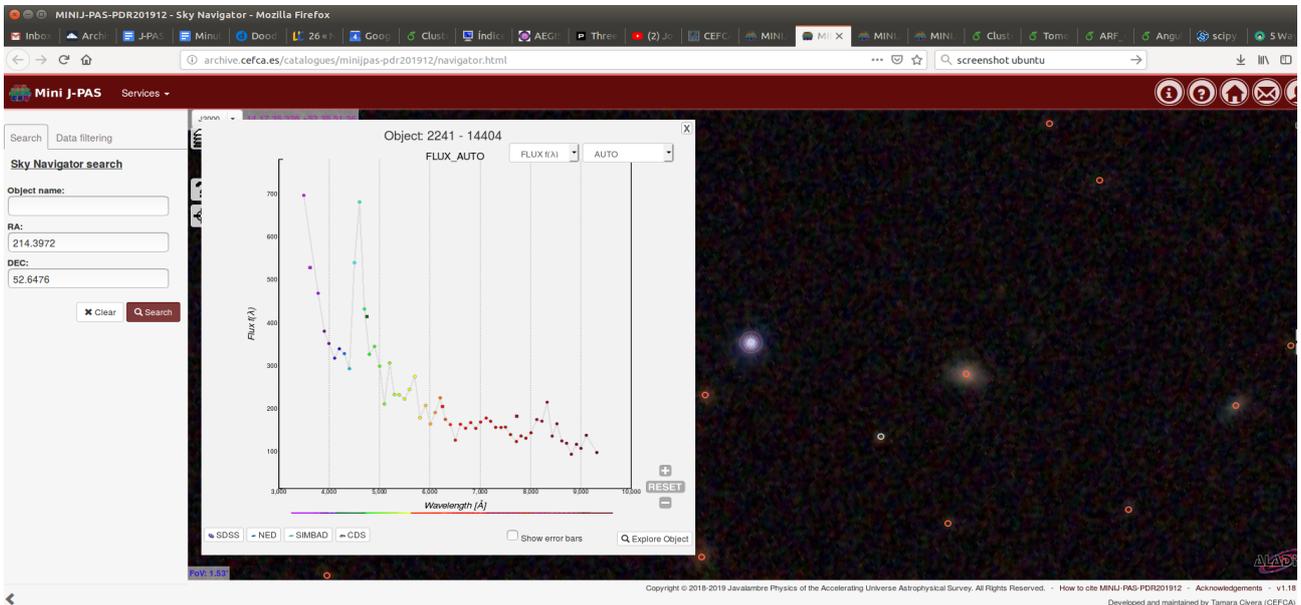
Esta escala se constituye pues como una *escala de distancia absoluta* en el universo, y se puede medir buscando el patrón espacial de *exceso* en la

distribución espacial de galaxias. Su medida en diferentes épocas cosmológicas nos proporciona información muy precisa sobre el ritmo de expansión del universo, y por tanto sobre la Energía Oscura, la misteriosa componente energética presente en el del universo evolucionado que acelera su ritmo de expansión, y cuyo estudio concentra ingentes esfuerzos en Cosmología.

La capacidad de J-PAS de proporcionar medidas *precisas* de la distancia (y por tanto de su distribución espacial) de decenas de millones de galaxias de forma indiscriminada le convierte en una poderosa arma para caracterizar el horizonte de sonido en el universo tardío. Esto se debe a la exquisita precisión de sus estimadas de desplazamiento al rojo fotométrico (del orden del 0.3%) a través de los foto-espectros. Pero esa misma precisión a la hora de medir desplazamientos al rojo de galaxias le permite también identificar, con una fiabilidad sin precedentes, aquellas galaxias que a su vez pertenecen cúmulos y grupos de galaxias, estructuras cosmológicas más masivas que también contienen valiosa información cosmológica. Asimismo, la calidad de los foto-espectros debiera permitir caracterizar la velocidad peculiar de las galaxias en las grandes escalas, lo que de por sí es también otro observable cosmológico. Por último, y si la calidad de las imágenes lo permite, la medida del efecto lente gravitatoria sobre decenas de millones de galaxias en diferentes épocas cosmológicas proporcionaría otro ángulo desde el que afrontar el estudio de la Energía Oscura.



Vista del Observatorio Astrofísico de Javalambre, en la cima del Pico del Buitre, (Teruel).
Crédito: Oscar Blanco Varela.



Ejemplo de foto-espectro de 60 puntos de un cuásar medido con mini-JPAS, accesible desde el portal de catálogos de la Unidad de Procesado y Almacenado de Datos (UPAD, <https://archive.cefca.es/catalogues>).

No obstante, dada la naturaleza indiscriminada de la calidad esperada de los foto-espectros, los casos científicos de J-PAS distan de reducirse a los cosmológicos. Los foto-espectros de J-PAS permitirán identificar de forma relativamente sencilla líneas de emisión en objetos como cuásares, núcleos de galaxias activos, o galaxias con alta formación estelar, construyendo lo que será el primer gran catálogo limitado en flujo de esas fuentes. La confección y el estudio de estos catálogos contribuirán decisivamente al conocimiento de la física de la generación y crecimiento de agujeros negros super-masivos, y la historia de formación estelar en el universo.

Asimismo, los foto-espectros de J-PAS caracterizarán de forma precisa las poblaciones estelares de *todas* las galaxias que superen un umbral de señal, lo que sin duda tendrá un enorme valor de legado para los estudios de evolución de galaxias. Para aquellas galaxias en nuestra proximidad que sean resueltas angularmente, las observaciones de J-PAS facilitarán un estudio 2D de las poblaciones estelares y su morfología, lo que permitirá profundizar significativamente en la comprensión de la física de formación y evolución de esos objetos. Para ello será crucial el hecho de con-

tar con una enorme estadística de objetos que permitirá caracterizar las propiedades de las galaxias con el entorno (bajodensidades o sobredensidades locales).

En el campo del estudio de nuestra galaxia, la Vía Láctea, de nuevo el carácter indiscriminado de los foto-espectros de estrellas permitirá investigar objetos peculiares o poco abundantes, como por ejemplo las enanas blancas, las estrellas con muy bajo contenido metálico, o cúmulos abiertos y globulares, algunos de ellos relacionados con las primeras fases de formación de nuestra Galaxia.

Finalmente, esperamos que J-PAS detecte una ingente cantidad de asteroides, y que a su vez sus foto-espectros sean sensibles a ciertos patrones en formas de bandas de absorción de estos cuerpos que permitan, al menos en gran parte, situar su origen, y contribuir así a entender la física de la formación de nuestro sistema solar.

Y por supuesto, debiera mencionarse lo imprevisto, lo no esperado, lo absolutamente nuevo, con lo que un cartografiado de estas características siempre puede llegar a sorprendernos...

El primer grado cuadrado de J-PAS: miniJPAS (o miliJPAS)

Estas expectativas están siendo confirmadas en el análisis de miniJPAS, el primer grado cuadrado de este cartografiado en 60 filtros, centrado en el campo AEGIS, y adquirido en el JST/T250 por medio de la cámara *Pathfinder*. La estimación de la calidad de los desplazamientos al rojo fotométricos, con una precisión relativa cercana al 0.5% para la mitad de las fuentes con $r < 22.5$, expresa de forma concisa una calidad en los datos que, a su vez, permite identificar cerca de 80 grupos de galaxias, distinguir filamentos y super-cúmulos en la estructura a gran escala, separar galaxias pasivas de galaxias con formación estelar significativa, o incluso comparar la emisión medida en ciertas líneas con sus contrapartidas espectroscópicas. La publicación de la presentación y análisis preliminar de este primer grado cuadrado de J-PAS se prevé en torno a las navidades de 2019. Los datos de miniJPAS han sido hechos públicos durante el encuentro de la RIA: *El universo en 56 colores: ciencia con los primeros datos de J-PAS*, celebrado en Teruel a primeros de diciembre.



Ejemplo de cúmulo de galaxias detectado en mini-JPAS.

Perspectivas futuras

La cámara panorámica JPCam, responsable de J-PAS, debiera ver la primera luz en el JST/T250 durante el primer trimestre de 2020, mientras que las operaciones científicas debieran comenzar en el último trimestre de ese mismo año. La estrategia de observación en el cartografiado se decidirá a lo largo de los próximos meses, en función del contexto de sinergias con otros grandes cartografiados que operan de forma simultánea (*Euclid*, WEAVE, etc), pero siempre sujeta a una optimización del impacto y contribución científicas de los datos adquiridos desde el OAJ.

Foto de familia de la Reunión de la RIA “*El Universo en 56 colores: ciencia con los primeros datos de J-PAS*”, celebrada en Teruel del 2 al 5 de diciembre de 2019.



En esta sección de nuestro Boletín pretendemos mostrar la cara más social de los miembros de nuestra sociedad: entradas y salidas de comités, nombramiento de nuevos directores de centros, cambios de afiliaciones, jubilaciones, premios, etc. Si cuando acabéis de leer la sección pensáis "Podían haber hablado también de..." os pedimos que nos enviéis vuestra entrada para incluirla en el próximo número. Gracias.

CAMBIO DE GESTORES EN LA AGENCIA ESTATAL DE INVESTIGACIÓN

El pasado 1 de agosto Isabel Pérez Grande (UPM) entró como nueva gestora de investigación espacial de la AEI en sustitución de José Carlos del Toro. Agradecemos a José Carlos su dedicación en estos tiempos particularmente complicados y deseamos a Isabel una fructífera etapa como gestora. Asimismo, Agustín Sánchez-Lavega cesa en sus funciones como coordinador del área de Astronomía y Astrofísica, sin que se haya hecho oficial todavía el nombramiento de la persona que le sucederá.

JOSÉ MIGUEL RODRÍGUEZ ESPINOSA, ASISTENTE DE LA SECRETARÍA GENERAL DE LA IAU

Jose Miguel Rodríguez Espinosa, expresidente de la SEA es, desde el 1 de septiembre de 2019, el nuevo asistente de la Secretaría General de la IAU. José Miguel será propuesto como Secretario General dentro de dos años, cargo del que tomará posesión inmediatamente después de la Asamblea General de 2021 en Bussan (Corea del Sur). ¡Enhorabuena, José Miguel!

PREMIO BREAKTHROUGH PRIZE IN FUNDAMENTAL PHYSICS DE 2020 A LA COLABORACIÓN DEL EVENT HORIZON TELESCOPE

La Fundamental Physics Prize (FPP) Foundation otorgó el Breakthrough Prize in Fundamental Physics de 2020 a la colaboración del Event Horizon Telescope, por haber obtenido la primera imagen de un agujero negro en la galaxia Virgo A (Messier 87, 3C 274). En la colaboración participan varios investigadores españoles, algunos de ellos miembros de la SEA: Antxon Alberdi, Juan Carlos Algaba, Rebecca Azulay, Raquel Fraga-Encinas, Roberto García, José Luis Gómez, Rubén Herrero-Illana, Iván Martí-Vidal, Santiago Navarro, Juan Peñalver, Eduardo Ros, Ignacio Ruiz, Salvador Sánchez, Miguel Sánchez-Portal y Pablo Torné. ¡Felicidades a todos!

ÉXITO DE LA ASTRONOMÍA EN LOS PREMIOS PRISMA 2019

Los Premios Prisma, concedidos por los Museos Científicos Coruñeses, han premiado este año a tres miembros de la SEA. El Prisma Especial del Jurado fue otorgado, por unanimidad, a Rafael Bachiller García. Y el Prisma al mejor proyecto singular de divulgación científica fue concedido, por mayoría, al corto "El Enigma Agustina", en el que han participado Emilio García y Natalia Ruiz. ¡Enhorabuena a los tres y al resto del equipo del Enigma Agustina!

DAVID GALADÍ, PREMIADO POR LA INTERNATIONAL DARK-SKY ASSOCIATION

La International Dark-Sky Association ha premiado al astrofísico del Observatorio de Calar Alto David Galadí-Enríquez por el desarrollo del Índice espectral G que indica la cantidad de luz azul emitida por las lámparas. ¡Enhorabuena, David!

MEDALLA DAVID BATES 2020 PARA AGUSTÍN SÁNCHEZ-LAVEGA

La prestigiosa Medalla David Bates ha sido otorgada a nuestro colega Agustín Sánchez-Lavega, por su excelente contribución al estudio de ciencias planetarias y del sistema solar. Es el primer científico español (junto con Beatriz Sánchez-Cano, que ha recibido el premio "Arne Richter Award for Outstanding Early Career Scientists") que recibe este reconocimiento de la European Geosciences Union. ¡Enhorabuena, Agustín!

NANDA REA, PREMIO JOVEN TALENTO CIENTÍFICO FEMENINO DE LA FRACE

Nanda Rea (ICE-IEEC) ha recibido el premio que otorga la Fundación Real Academia de Ciencias de España (FRACE) al Joven Talento Científico Femenino en la modalidad de Física y Química por hallazgos como el descubrimiento del primer magnetar de campo magnético bajo, que ha supuesto el impulso a investigaciones en otras ramas de la Astronomía. ¡Muchas felicidades Nanda!

LAS MIL CARAS DE LA LUNA

Eva Villaver

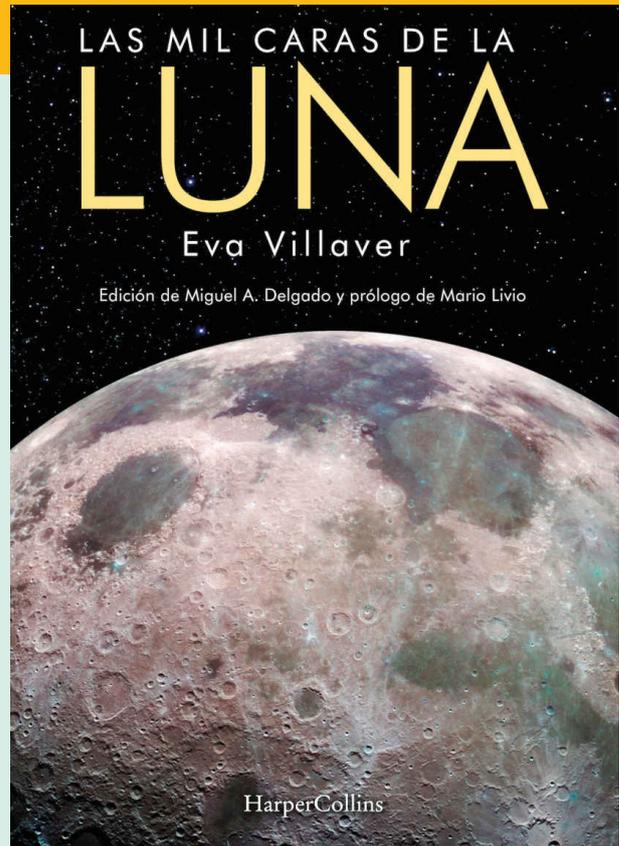
ISBN: 9788491393689

Editorial Harper Collins

Este ha sido el año de la Luna. El pasado mes de julio celebramos que alguien de nuestra especie pisó por primera vez nuestro satélite hace 50 años. La efeméride nos animó a volver a mirar la Luna como un espacio más próximo. También se ha escrito mucho sobre la Luna este año, siendo el libro de nuestra colega Eva Villaver uno de los más sugerentes. En *Las mil caras de la Luna*, la Dra. Villaver nos acerca la Luna desde muchos puntos de vista. Obviamente trata con detalle la carrera espacial que llevó a Neil Armstrong a pronunciar su célebre frase: “Este es un pequeño paso para el hombre, pero un gran salto para la Humanidad” al poner sus pies sobre el polvo lunar del sur del Mar de la Tranquilidad. La autora nos explica con detalle los prolegómenos y consecuencias de este hito, en particular las misiones Apolo anteriores y posteriores al Apolo 11.

Pero este precioso libro va mucho más allá y en él se entrelazan referencias astronómicas con interesantísimas referencias culturales de campos tan diversos como la literatura, la pintura, el teatro, la música o el cine, así como de otras disciplinas científicas como la medicina, la química o la geología.

En el primer capítulo “Lunáticos”, la autora juega con enorme acierto con la polisemia de este término para introducirnos en su particular modo de mostrarnos todas las caras de la Luna. Continúa con una historia fascinante en el capítulo 2, titulado “Piedras”, sobre las rocas que nos ha caído del cielo y la posibilidad de que alguna viniera de la Luna. La conquista del espacio, protagonizada primero por animales es el tema del capítulo 3: “Tortugas”, en el que narra con emoción el primer paseo espacial de Alekséi Leónov y sobre todo sus problemas para regresar a la nave. El capítulo siguiente “Huellas” es mi preferido. Narra, entre referencias a los hombres lobo y a *Blade Runner*, la primera pisada de Neil Armstrong y las siguientes de Buzz Aldrin, para acabar explicándonos qué paso con la famosa bandera que plantaron en la Luna. Recordemos que 2019, además de ser el año de la Luna, es en cierto modo, el año de *Blade Runner*, ya que la acción de la genial película de Ridley Scott transcurre en noviembre de 2019 y además, justamente el 19 de julio de 2019, mientras se celebraba en todo el mundo el cincuentenario de la llegada a la Luna, fallecía el actor Rutger Haure que encarnaba al replicante en esa película. En “El ritmo del tiempo”, el capítulo 5, nos habla la Dra. Villaver de la medida del tiempo, de los ciclos lunares y los calendarios, pero también de la edad del universo, del miedo que



produce el desconocimiento, de los sueños y de Selene, la diosa griega de la Luna. En el siguiente, “Cráteres y vino”, la autora repasa la orografía lunar, con los mares y montañas, y las cicatrices que ha dejado el paso del tiempo, sin olvidarse del toro enamorado de la Luna. “Orígenes”, el séptimo, está dedicado a las diferentes teorías que explican el origen de nuestro satélite y contiene una entrañable historia sobre dos hermanos de Logroño y el wolframio. En el siguiente capítulo, “Luna nueva”, las fases lunares y los eclipses de Sol y Luna entran en juego, así como su papel en las diferentes culturas y en el avance de la ciencia; a destacar el eclipse total de Sol de mayo de 1919, cuyo centenario hemos celebrado también este año, que permitió a Eddington y Crommelin medir el ángulo de deflexión de la luz de estrellas próximas al limbo solar. En el último capítulo, “Aletas”, Eva Villaver nos explica la influencia que han tenido las fuerzas de marea debidas a la Luna en la evolución de las especies, para acabar reflexionando sobre nuestro posible regreso a la Luna en el futuro.

El prólogo es de Mario Livio. El libro, además, cuenta con una edición cuidadísima, a cargo de Miguel A. Delgado, que incluye un suplemento a color con fotografías y reproducciones de cuadros y comics muy curiosos relacionados con la Luna y con el texto. En definitiva, una lectura que recomiendo con entusiasmo. No se la pierdan.

Vicent J. Martínez
Observatori Astronòmic
de la Universitat de València

Análisis Bayesiano de la corona solar

Autora: María Montes Solís (mmsolis@iac.es)

Tesis doctoral dirigida por: Íñigo Arregui

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias / Universidad de La Laguna

Fecha de lectura: 8 de mayo de 2019

A pesar de los últimos avances hechos en instrumentación para obtener datos y el desarrollo de nuevas técnicas para analizarlos, la corona solar es una de las regiones del Sol con más incógnitas por resolver. Nuevos métodos que permitan la comparación entre las observaciones y los modelos teóricos o numéricos son necesarios para desvelar las condiciones y los procesos físicos que tienen lugar en esta región de la atmósfera solar.

Esta tesis supone un avance en el desarrollo de esos métodos mediante la elaboración de herramientas basadas en estadística Bayesiana. La estadística Bayesiana permite incluir la información de la que se dispone previamente a las mediciones y todo tipo de incertidumbres en el estudio, además de las propias observaciones. Así, un análisis Bayesiano de la corona hace posible, entre otras cosas, la obtención de la probabilidad de que ciertos parámetros físicos tomen determinados valores o inferencia, comparar la plausibilidad de que distintos modelos expliquen lo observado y predecir la probabilidad de nuevas observaciones.

La tesis se enfoca en estudios de sismología coronal, en la que se comparan observaciones y modelos teóricos de ondas magneto-hidrodinámicas. En particular, nos hemos centrado en el estudio de las ondas transversales en dos estructuras de la corona: los bucles coronales y los filamentos que conforman la estructura fina de las prominencias.

En el caso de los bucles coronales, hemos inferido en primer lugar los valores más probables del campo magnético que los define y su dependencia con la densidad del bucle. Además, hemos inferido el contraste de densidad entre la corona y el bucle, así como otros parámetros ligados a su estructura. También hemos calculado la plausibilidad de los mecanismos de absorción resonante, mezcla de fases y fuga de ondas, de explicar el amortiguamiento de las ondas transversales soportadas. Los resultados obtenidos apuntan a que ninguno de estos mecanismos parece explicar todos los eventos de la misma naturaleza. La evidencia depende en gran medida de los valores concretos del período y el tiempo de amortiguamiento de la onda medidos y de sus incertidumbres. Finalmente, hemos

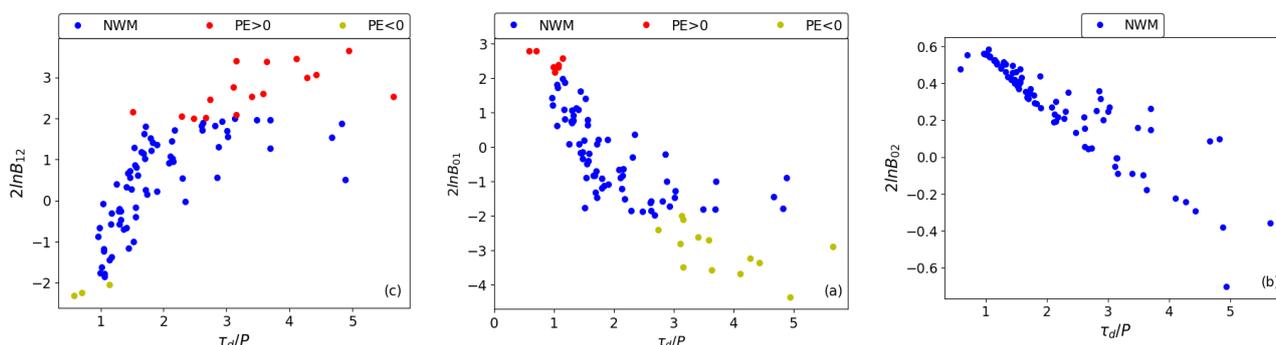
considerado la absorción resonante de ondas de propagación para ver la evidencia resultante de considerar un perfil de amortiguamiento exponencial o un perfil Gaussiano. Esta evidencia señala que ninguno de los perfiles es más adecuado que el otro en lo que respecta a los bucles coronales.

En lo que a las prominencias se refiere, hemos obtenido también los valores más probables del campo magnético que define los filamentos que las forman. A continuación, hemos considerado el cociente entre el modo fundamental y el primer armónico de las ondas transversales para inferir el contraste de densidad de estas estructuras, así como la longitud de los filamentos. Cuando el modelo para el cociente de períodos en la aproximación de filamentos cortos se compara con el mismo modelo en la aproximación de filamentos largos, los resultados indican que cocientes entre períodos con valores en torno a la unidad son mejor explicados por la aproximación de filamentos largos, mientras que el resto de valores son más plausibles cuando se considera la aproximación de filamentos cortos. Además de esto, hemos considerado un modelo que incorpora el efecto de los flujos de masa para inferir la longitud total de los tubos de flujo que contienen el filamento. Después, hemos considerado los modelos de absorción resonante en el continuo de Alfvén, absorción resonante en el continuo lento y difusión de tipo Cowling para inferir los parámetros asociados a ellos, así como calcular su plausibilidad a la hora de explicar las observaciones. En este caso, el mecanismo que parece explicar el amortiguamiento de ondas transversales es claramente la absorción resonante en el continuo de Alfvén. Por último, cuando comparamos los perfiles exponenciales y Gaussianos de amortiguamiento en los filamentos, las evidencias dependen de los valores particulares de la longitud de amortiguamiento y la longitud de onda.

Con todo ello, algunas de las líneas de investigación que pueden derivarse de esta tesis son:

- Dentro de la sismología coronal, el análisis de propiedades y procesos de otras estructuras solares como por ejemplo las espículas, la diferenciación de las contribuciones debidas a la presencia de flujos u ondas en los procesos dinámicos observados y la mejora de la caracterización de las señales ondulatorias, ofreciendo un método alternativo al ajuste por mínimos cuadrados.
- La separación de la contribución debida a la temperatura y a la densidad en las medidas de emisión diferencial (DEMs) mediante la combinación de las observaciones con los modelos teóricos de DEMs, además de la comparación entre modelos de DEMs correspondientes a diferentes procesos dinámicos de estructuras coronales.
- Finalmente, la comparación de los modelos propuestos como origen del calentamiento coronal.

Comparación de mecanismos de amortiguamiento de ondas transversales en bucles coronales. (a) Comparación entre absorción resonante y mezcla de fases. (b) Comparación entre absorción resonante y fuga de ondas. (c) Comparación entre mezcla de fases y fuga de ondas. Algunos eventos muestran una evidencia positiva a favor de uno de los modelos (rojo a favor del primer modelo o amarillo a favor del segundo modelo) pero, en general, la evidencia a favor de uno u otro modelo no es suficiente (azul) para decir que un mecanismo explica mejor las observaciones.



Caracterización desde Tierra de exoplanetas en tránsito

Autor: David López Fernández-Nespral (davidnespral@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por:

Roi Alonso Sobrino y Hans J. Deeg

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias / Universidad de La Laguna

Fecha de lectura: 7 de junio de 2019

Esta tesis está enfocada en el método de análisis de espectrofotometría de atmósferas exoplanetarias por el método de espectroscopía de transmisión con observaciones hechas desde Tierra. La motivación de este trabajo es estudiar las limitaciones de la técnica de espectroscopía de transmisión con observatorios terrestres. En concreto, explorar las posibilidades de OSIRIS/GTC para realizar este tipo de estudios, así como identificar las principales fuentes de error y desarrollar métodos para corregirlos. Por otro lado, elaborar técnicas de reducción y análisis de los datos que puedan ser de utilidad para futuros desarrollos de la técnica de espectroscopía de transmisión, dado el potencial futuro de estas observaciones. Por ejemplo, el JWST utiliza esta técnica y ARIEL (ESA) será desarrollado especialmente para la espectroscopía de transmisión. Las observaciones para mi tesis se llevaron a cabo en el rango óptico con el instrumento OSIRIS montado en el *Gran Telescopio Canarias* (GTC), situado en el Observatorio del Roque de Los Muchachos, La Palma.

Los planetas de estudio son del tipo *Hot Jupiter* (seis en total) y dos enanas marrones. Dos parejas de *Hot Jupiter* gemelos (planetas con similares parámetros físicos: radio, masa, distancia orbital y tipo espectral de la estrella anfitriona) fueron estudiados en conjunto para entender qué similitudes o diferencias tienen sus espectros de transmisión. Por último, un intento de caracterizar dos enanas marrones fue llevado a cabo para testear lo que la teoría dice sobre las atmósferas de estos objetos, es decir, que no debería detectarse ninguna señal atmosférica y así poder verificar que nuestra metodología y análisis no introducen señales falsas de absorción en los espectros de transmisión.

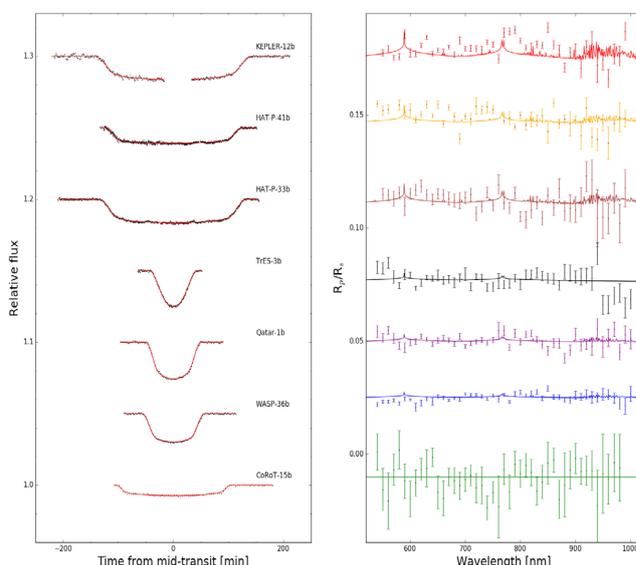
Muchos de los estudios de caracterización de atmósferas exoplanetarias muestran ruidos sistemáticos, no astronómicos, en sus datos. Estos ruidos sistemáticos, en su mayoría, son debidos a problemas causados por el propio instrumento y que son difíciles de tratar para corregirlos en los datos originales.

En el capítulo 2 se explica extensamente el proceso de reducción llevado a cabo en los datos y su posterior análisis para la obtención del espectro de transmisión. En el capítulo 3 se compara el espectro de transmisión del planeta TrES-3b calculado por autores diferentes a partir de los mismos datos espectro-

fotométricos y de los cuales obtuvieron resultados diferentes. Nosotros realizamos un análisis de los mismos datos, para comprobar la validez de nuestro código. También tenemos en cuenta más detalles a la hora del análisis que los autores de estas publicaciones. En el capítulo 4 se hace un extenso análisis de datos espectrofotométricos de Qatar-1b. El estudio se centra en cómo variaciones en el modelado de sistemáticos y efectos debido a los coeficientes del *limb darkening* pueden llevar a resultados diferentes en el espectro de transmisión final. En el capítulo 5 se presenta un espectro de transmisión de WASP-46b basado en dos tránsitos consecutivos. El estudio muestra cómo el análisis de ambos tránsitos en conjunto da como resultado un mejor espectro de transmisión con menor error que un análisis de cada uno por separado. En el capítulo 6 se hace un análisis detallado de las observaciones de los planetas gemelos, las cuales presentan multitud de efectos sistemáticos en sus datos. Para cada observación se lleva a cabo un modelado de dichos sistemáticos para una corrección y análisis de su espectro de transmisión. En el capítulo 7 un análisis sobre el espectro de transmisión de CoRoT-15b, una de las enanas marrones más masivas conocidas hasta la fecha, es llevado a cabo, corroborando la hipótesis de que las atmósferas de este tipo de objetos se comportan igual que la de planetas con atmósferas con neblina, al menos para este caso. En el capítulo 8 se realiza una síntesis global de mis resultados, viendo los espectros de transmisión como un todo. Por último, en el capítulo 9 se presentan las conclusiones y futuras investigaciones. Además, un apéndice con los resultados de una colaboración con el grupo KESPRINT es añadido a esta tesis, en el que resultó mi primer artículo científico como primer autor. El artículo consiste en la determinación de las masas de dos planetas de un mismo sistema planetario por los métodos de velocidad radial y TTVs.

La figura muestra el resultado principal de esta tesis: los espectros de transmisión obtenidos para los exoplanetas observados y la enana marrón. La figura también muestra sus curvas de tránsito de luz blanca después de eliminar la sistemática, junto con los modelos de tránsito que mejor ajustan. Los espectros de transmisión presentan una variedad de características de absorción espectral, así como pendientes de dispersión óptica de acuerdo con su altura de escala. En esta figura también comparamos nuestros espectros de transmisión con los modelos teóricos libres de nubes de Fortney et al. (2010).

Panel izquierdo: curvas de luz blanca de tránsito de la muestra de esta tesis después de eliminar los efectos sistemáticos junto con el modelo de tránsito que mejor ajusta. Panel derecho: espectros de transmisión GTC/OSIRIS, que son la diferencia entre espectros en tránsito y fuera de tránsito. Las líneas sólidas de colores muestran modelos atmosféricos correspondientes a modelos sin nubes. Los espectros se han desplazado y se clasifican en orden decreciente en función de la altura de la escala.



Estudio del polvo en la atmósfera de Marte mediante las cámaras de ingeniería del rover Mars Science Laboratory

Autor: Hao Chen-Chen (hao.chen@ehu.eus)

Tesis doctoral dirigida por: Agustín Sánchez-Lavega y Santiago Pérez-Hoyos

Centro: Universidad del País Vasco (UPV/EHU)

Fecha de lectura: 11 de julio de 2019

Las atmósferas planetarias diferentes a la de la Tierra pueden actuar como laboratorios naturales donde evaluar las diversas hipótesis y teorías, contribuyendo a un mejor entendimiento de los mecanismos que controlan los sistemas climáticos. La caracterización de la evolución de la atmósfera de Marte y su clima es esencial para averiguar si en el pasado pudo reunir las condiciones ambientales necesarias para albergar vida.

Las partículas de polvo suspendido juegan un papel fundamental en la atmósfera marciana: su interacción con la radiación solar incidente modifica el campo de temperaturas de la atmósfera y afecta a su dinámica; esto a su vez redistribuye el polvo, dando lugar a un sistema radiativo-dinámico complejo. Por ello, la determinación de la distribución del polvo y de sus propiedades físicas es de gran relevancia para los modelos climáticos y de circulación atmosférica de Marte, siendo uno de los principales objetivos científicos en las misiones de exploración. Durante las últimas décadas se ha acumulado una gran cantidad de observaciones obtenidas desde órbita y superficie, donde tiene una gran importancia la información conseguida por las mediciones efectuadas *in situ* por *landers* y *rovers*.

El objetivo de la misión Mars Science Laboratory (MSL) es analizar el entorno del cráter Gale en busca de evidencias de habitabilidad. Además de cámaras científicas, el rover MSL está equipado con doce cámaras de ingeniería: cuatro *navigation cameras* (Navcam) y ocho *hazard avoidance cameras* (Hazcam), cuya finalidad es proporcionar guiado y soporte al vehículo y sus instrumentos. Las Navcam (FOV: 45°×45°) están localizadas en el mástil del rover, mientras que las Hazcam (FOV: 126°×126°) se encuentran fijadas al chasis (cuatro en la parte frontal, cuatro en la parte posterior). Todas cuentan con detectores CCD de 1024×1024 píxeles siendo la longitud de onda efectiva de 650 nm.

La motivación de esta tesis doctoral es contribuir a la caracterización de las partículas de polvo suspendidas en la atmósfera de Marte mediante el uso de las cámaras de ingeniería de MSL. A pesar de no haber sido concebidas como instrumentos científicos, sus observaciones pueden emplearse en estudios atmosféricos, proporcionando así una base de datos adicional y expandiendo la cobertura temporal existente. Los objetivos son:

- Revisar la base de datos de imágenes y generar las rutinas de calibración y navegación.
- Desarrollar un modelo de transporte radiativo para simular la distribución angular de radiancia en el cielo.
- Derivar la opacidad atmosférica debida al polvo y las propiedades físicas de las partículas.
- Adaptar los desarrollos realizados para el procesamiento y análisis de datos de futuras misiones a Marte.

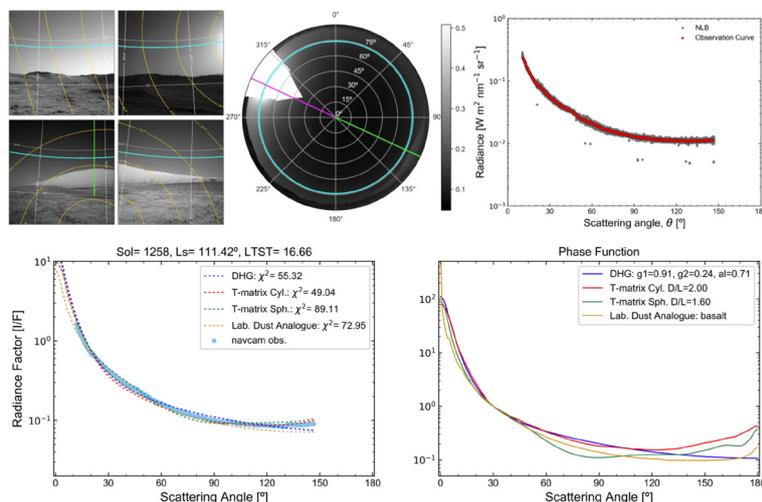
Además del espesor óptico del polvo, son propiedades relevantes de las partículas para los modelos climáticos su tamaño y forma, condensadas en la función de fase $P(\theta)$. Para determinar dichas propiedades se analiza el decaimiento del brillo del cielo en función de la distancia angular respecto al centro del disco solar (ángulo de dispersión o *scattering*). En particular, la variación del brillo para ángulos de *scattering* pequeños ($<30^\circ$)

está controlado por el tamaño de las partículas, mientras que la región de ángulos medios y altos (120° a 180°) proporciona información acerca de la forma de las mismas. Se han analizado imágenes calibradas de Navcam apuntando al disco solar en el primer caso, mientras que para evaluar el brillo a altos ángulos de *scattering* se emplean secuencias de cielo completo (*Navcam sky survey*) y observaciones simultáneas de Hazcam. Las observaciones se comparan con simulaciones de radiancia del cielo mediante nuestro modelo de transporte radiativo. Las curvas de radiancia son modeladas a partir de los parámetros que definen las propiedades de las partículas: espesor óptico, distribución de tamaños, parámetros de la función de fase analítica *Double Henyey-Greenstein* (DHG), la relación de aspecto diámetro/longitud (D/L) en los cálculos *T-matrix* para partículas de forma cilíndrica y esférica y finalmente también con funciones de fase experimentales obtenidas a partir de mediciones en laboratorio de diversos análogos de polvo marciano (*Granada Scattering Database*). Se buscan los valores de los parámetros que generan la curva modelada que mejor ajusta a la observación según un criterio de error mínimos cuadrados.

Los resultados muestran el ciclo estacional habitual de espesor óptico de la atmósfera, así como una correlación positiva entre opacidad y tamaño de las partículas. Los valores medios de los resultados obtenidos para los parámetros (g_1, g_2, α) de la función de fase DHG tienen parámetro de asimetría $g = 0,65$. Los mejores ajustes para partículas modeladas con *T-matrix* corresponden a partículas de forma cilíndrica con relación de aspecto D/L (diámetro/longitud) 0,7 y 1,9; así como esferoides de D/L=2,0 (discos). Finalmente, el basalto es el análogo marciano que mejor ajusta en la mayoría de las comparaciones. Los resultados obtenidos en este estudio muestran una buena concordancia con trabajos previos.

Las futuras actividades a desarrollar a raíz del estudio realizado en esta tesis doctoral incluyen:

- Estudio de las observaciones de MSL correspondientes a la tormenta de polvo global de 2018.
- Empleo de nuevos métodos y códigos de modelización de las propiedades radiativas para partículas no esféricas y agregados.
- Desarrollo de las rutinas necesarias para el análisis de futuros datos obtenidos por las misiones InSight, ExoMars 2020 y Mars2020 (instrumento MEDA).
- Implementación del código de transporte radiativo y de las propiedades del polvo derivadas en el modelo de mesoescala Martian Regional Atmospheric System (MRAMS) para simular las condiciones climáticas en tormentas de polvo de carácter local.



Parámetros fundamentales de estrellas poco masivas en binarias eclipsantes: la relación masa-radio

Autor: Ramón Iglesias Marzoa

Tesis doctoral dirigida por: María Jesús

Arévalo (ULL, IAC) y Mercedes López-Morales (CfA, Harvard & Smithsonian)

Centro: Universidad de La Laguna

Fecha de lectura: 23 de julio de 2019

Esta tesis se enmarca en un proyecto observacional a largo plazo para medir de forma fiable los parámetros fundamentales, principalmente masas y radios, de estrellas poco masivas ($M < 1 M_{\odot}$), con el fin de compararlos con los predichos por los modelos teóricos. Estos parámetros solo se pueden obtener simultáneamente de observaciones de velocidades radiales y de curvas de luz de estrellas binarias eclipsantes separadas de doble línea.

Estudios previos sobre estrellas poco masivas muestran que, para una masa dada, los radios son entre 10% y 15% mayores que los predichos por los modelos estelares. Muchos de estos estudios están basados en el análisis de binarias eclipsantes de período corto ($P < 3$ días), en las cuales las componentes están sincronizadas por las fuerzas de marea y la órbita está circularizada. La explicación más plausible para esta discrepancia es la hipótesis del inflado magnético. En esta hipótesis, los campos magnéticos estelares se refuerzan a causa de las altas velocidades de rotación de las componentes sincronizadas. Como consecuencia, la actividad estelar también aumenta y, típicamente, estas estrellas poco masivas muestran manchas extensas que cubren una fracción notable de la superficie estelar. Dado que las manchas estelares suelen ser regiones de menor temperatura, irradian menos flujo luminoso, especialmente a longitudes de onda cortas. Para compensar el flujo bloqueado por las manchas, el radio estelar debe ser más grande que en una estrella sin manchas.

Nuestro proyecto observacional consiste en el seguimiento fotométrico y espectroscópico de algunos sistemas descubiertos en los últimos cartografiados fotométricos de gran campo, con el fin de medir sus masas y radios de forma precisa. En esta tesis se presentan los resultados obtenidos para dos de estos sistemas: T-Cyg1-12664 y NSVS 10653195.

Para ajustar simultáneamente de una forma fiable los parámetros orbitales de binarias espectroscópicas, de las cuales una fracción importante son además binarias eclipsantes, es necesario ajustar una función con seis o siete parámetros, dependiendo de si la binaria es de línea simple o de doble línea. Se ha desarrollado un código robusto llamado *rvfit* que emplea una técnica conocida como *Adaptive Simulated Annealing* (ASA), que está diseñado para poder hacer el ajuste sin tener ningún conocimiento previo de los valores de los parámetros orbitales. El código asume un sistema estrella-estrella o estrella-planeta en órbitas keplerianas. Para demostrar las prestaciones del programa se han ajustado varios sistemas conocidos, incluyendo binarias de doble línea y de línea simple y sistemas con exoplanetas.

La binaria eclipsante T-Cyg1-12664 (Devor et al., 2008) fue descubierta en el campo T-Cyg1 del cartografiado TrES y está dentro de los límites del campo de visión de la misión *Kepler*. Esto indica que hay una monitorización fotométrica de alta precisión a lo largo de varios años con una cadencia de ~ 27 minutos. Este seguimiento permite estudiar la evolución de las manchas y buscar cambios de período orbital. Nuestra fotometría en tierra se superpone con las observaciones de Kepler, lo que permite caracterizar con precisión el sistema. T-Cyg1-12664 fue analizada por primera vez por Devor (2008) y más tarde por Çakırlı et al. (2013), pero la solución encontrada por estos autores difiere de los valores esperados para estrellas poco masivas. En este último artículo, los autores asumen una órbita circular, pero nosotros demostramos que es ligeramente elíptica. Nuestros resultados muestran que el sistema de T-Cyg1-12664 está compuesto de una primaria G6V inflada y una secundaria M3V cerca del límite de convección completa que está conforme a los modelos.

La estrella binaria eclipsante NSVS 10653195 está listada entre los candidatos a binarias poco masivas del cartografiado NSVS (Shaw & López-Morales, 2007) y su curva de luz fue analizada inicialmente por Coughlin & Shaw (2007). Otras curvas de luz fueron analizadas posteriormente por Wolf et al. (2010), Zhang et al. (2014) y Zhang et al. (2015). En todas estas publicaciones se ajustaron solo curvas de luz; por tanto, las masas de las componentes y la escala del sistema son desconocidos. Nuestro estudio incluye, por primera vez, un análisis conjunto de las velocidades radiales y de las curvas de luz ópticas e infrarrojas y proporciona masas y radios precisos para las dos estrellas. Cuando modelamos este sistema ya estaba disponible el *Gaia Data Release 2* (DR2) y la distancia al sistema era conocida con precisión. Este sistema binario está compuesto de estrellas K6V y K7V similares y sus dimensiones físicas confirman el escenario de radios inflados.

Finalmente, se presenta el resultado de una calibración fotométrica de varias binarias eclipsantes poco masivas en nuestro programa, con el fin de obtener colores fotométricos fiables fuera de eclipse. Estos colores fotométricos son clave para medir las temperaturas efectivas medias de las binarias.

Página de la izquierda:

Fila superior: composición de imágenes de una secuencia Navcam sky survey y la curva de radiancia observada en función del ángulo de scattering a lo largo de un plano horizontal con misma elevación que el Sol.

Fila inferior: mejores ajustes en la comparación de curvas observadas y simuladas (izquierda) y las funciones de fase que la generan (derecha).

Estrellas masivas en Cygnus OB2

Autora: Sara Rodríguez Berlanas

(srberlan@iac.es, sara.rb@ua.es)

Tesis doctoral dirigida por:

Artemio Herrero Davó

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias

Fecha de lectura: 26 de julio de 2019

Esta tesis es un compendio de tres artículos (más un capítulo adicional) donde se recogen los frutos de un estudio enfocado en Cygnus OB2, dentro del complejo Cygnus-X, una de las asociaciones de formación estelar OB más cercana, masiva y joven de nuestra Galaxia. Esta región representa un excelente lugar donde estudiar las propiedades, formación y evolución de estrellas masivas en un entorno de formación estelar muy activo. Nuestro objetivo principal es incrementar el conocimiento actual que existe de esta asociación y su población estelar. Para ello, hemos llevado a cabo cuatro estudios diferentes (aunque relacionados) donde se han caracterizado las principales propiedades físicas de su población masiva.

En primer lugar presentamos un estudio de membresía en la región de Cygnus OB2 y sus alrededores con el fin de completar la población de estrellas de tipo temprano conocida hasta el momento. Haciendo uso de nuevos datos observacionales, hemos incrementado el número de miembros OB conocidos (42 nuevos miembros, incluidas 11 estrellas tipo O). Sin embargo, encontramos limitaciones para obtener un censo completo debido a los criterios fotométricos adoptados en los criterios de selección ($B < 16$ mag, $K_s < 9$ mag) y la fuerte, intensa y variable extinción interestelar existente en la zona. Además, hemos determinado una dispersión de edad en Cygnus OB2 de entre 1 y 6 Myr, así como confirmado una correlación entre edad y longitud Galáctica en la región. Esto sugiere que la formación masiva en la zona ha procedido de bajas a altas longitudes Galácticas, es decir, desde Cygnus OB9 hacia Cygnus OB2, con un fuerte pico en la parte norte de esta última.

Dado que existen sólidas indicaciones que apuntan a que muchas de las estrellas masivas de Cygnus OB2 ya han explotado como supernovas a lo largo de su historia, seguidamente hemos realizado un estudio químico de la asociación con el propósito de detectar posibles inhomogeneidades y comprobar si también existe una correlación entre composición química y longitud Galáctica que pudiera evidenciar procesos de autoenriquecimiento. Encontramos una composición química homogénea a lo largo de la longitud Galáctica, sin ninguna evidencia de autoenriquecimiento significativo, con valores medios de $7,53 \pm 0,08$ dex y $8,65 \pm 0,12$ dex para las abundancias de silicio y oxígeno, respectivamente. La estimación de la contribución al enriquecimiento de oxígeno por posibles SNe que habrían explotado en la región nos indica que la detección de estos efectos en una región como Cygnus OB2 está más allá de la precisión de nuestros análisis, evidenciando las dificultades que existen para realizar predicciones cuantitativas del nivel requerido en una región tan activa como esta.

En el tercer estudio de esta tesis, presentamos un análisis de la estructura espacial interna de la asociación haciendo uso

de astrometría *Gaia*-DR2. Se ha cuantificado la subestructura observada a lo largo de la línea de visión mediante el uso de inferencia Bayesiana y la creación de un modelo parametrizado que reproduce la distribución de paralaje observada. De esta manera hemos identificado dos grupos estelares superpuestos pero separados espacialmente por varios cientos de parsecs dentro de Cygnus OB2. El grupo principal se encuentra a unos 1760 pc, es decir, a una distancia más lejana de lo considerado en los últimos estudios. La implicación principal es que su contenido estelar es más masivo y luminoso de lo estimado. El segundo grupo se encuentra unos 400 pc por delante, en torno a 1350 pc, y aparece espacialmente más disperso que el grupo principal. Además, el cálculo de probabilidades individuales de membresía nos ha permitido identificar posibles contaminantes como no miembros de la asociación.

Finalmente, en un último capítulo adicional, presentamos el análisis espectroscópico de la población masiva tipo O conocida hasta el momento en Cygnus OB2. Haciendo uso de nuevos y previos datos observacionales hemos creado el censo espectroscópico de estrellas tipo O más completo hasta el momento de la asociación, consistente en 77 estrellas incluyendo aquellos nuevos miembros identificados en el primer estudio de esta tesis. Así mismo, hemos identificado nuevos sistemas binarios y llevado a cabo el análisis espectroscópico de toda la muestra (excluyendo las estrellas SB2 detectadas) para así obtener la distribución de velocidades de rotación y sus principales parámetros estelares. Encontramos la distribución de velocidades de rotación similar a la obtenida en otras regiones Galácticas (y extragalácticas). Sin embargo, existen algunas diferencias significativas debidas principalmente a la baja resolución de algunos de nuestros datos (que limita la velocidad mínima detectable) y al hecho de que el censo de estrellas O en Cygnus OB2 es aún incompleto, como se detectó en el primer estudio de esta tesis. Adicionalmente, gracias a distancias derivadas a partir de datos astrométricos proporcionados por *Gaia*-DR2, hemos estimado radios, luminosidades y masas espectroscópicas para todas aquellas estrellas con astrometría fiable ($RUWE \leq 1.4$). También hemos derivado masas evolutivas a través de interpolación con trazas evolutivas teóricas, encontrando sistemáticamente $M_{ev} > M_{sp}$. Sin embargo, no podemos concluir ningún patrón obvio debido a las grandes incertidumbres derivadas para las masas evolutivas y a la incompletitud de nuestra muestra. Finalmente, el estado evolutivo general de la asociación ha sido discutido a partir de la creación del diagrama Hertzsprung-Russell (HRD). Confirmamos nuevamente que la formación estelar en la región ha tenido lugar durante los últimos 1-6 Myr, pero por primera vez hemos podido distinguir tres brotes internos: de 1.5, 3 y 5 Myr. Todos tienen un límite superior de masa similar ($\sim 60-85 M_{\odot}$) aunque en el caso del brote de 5 Myr algunas de sus estrellas podrían haber ya evolucionado a otros estados más tardíos. Además, al usar la versión espectroscópica de este diagrama (sHRD) encontramos resultados acordes, excepto por el hecho de que se derivan masas mayores en este caso. De confirmarse esta tendencia, esto supondría un punto importante a tener en cuenta en el uso del sHRD.

Como apunte adicional, los efectos de no considerar el ensanchamiento de macroturbulencia (v_{mac}) cuando este puede ser considerado como un límite superior, así como las implicaciones de fotometría adoptada y ley de extinción a la hora de caracterizar la extinción interestelar de la región, han sido evaluados. En el primer caso, aunque para nuestra muestra la

distribución de velocidades de rotación no se ve afectada por una posible sobreestimación de v_{mac} , algunos valores individuales de la proyección de velocidad de rotación (v_{sin}) varían significativamente. En el segundo caso, encontramos que tanto la fotometría como la ley de extinción usada representan fuentes adicionales de error y tienen un impacto importante en la caracterización de la extinción de regiones muy oscuras, especialmente cuando se usan colores fotométricos en el IR cercano.

Los resultados presentados en el tesis nos aportan, por tanto, una visión ampliada y actualizada de Cygnus OB2, acercándonos a comprender e interpretar con mayor precisión el

origen y evolución de esta asociación de formación estelar, el complejo Cygnus-X y asociaciones OB en general. Esta tesis proporcionará un punto de partida para la optimización y desarrollo del *survey* enfocado en el complejo estelar de Cygnus-X, que se llevará a cabo con el próximo espectrógrafo multiobjeto WEAVE (cuya primera luz se estima para principios del 2020) y proporcionará datos espectroscópicos homogéneos y de alta calidad para varios cientos de estrellas OB de toda la región.

Tesis disponible en:

<https://www.educacion.gob.es/teseo/mostratRef.do?ref=1793859>

<http://research.iac.es/proyecto/iacob/pages/phd-thesis.php>

Acreción de gas en modo frío en el Universo local

Autora: Amanda María Del Olmo García
(amanda.olmo.garcia@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Jorge Sánchez Almeida y Casiana Muñoz-Tuñón

Centro: Universidad de La Laguna / Instituto de Astrofísica de Canarias

Fecha de lectura: 26 de julio de 2019

Uno de los principales mecanismos de formación de discos de galaxias es la acreción de gas desde el medio intergaláctico (IGM; también llamada *cold-flow*). El gas acrecido alimenta y es responsable de la formación estelar en las galaxias. La necesidad de este suministro de gas externo es evidente en las simulaciones numéricas; sin embargo, ha sido bastante difícil de confirmar con observaciones. Esta tesis se centra en el estudio de galaxias extremadamente pobres en metales (XMP), en las que el gas que forma las estrellas tiene una metalicidad inferior a una décima parte de la metalicidad solar. Son relevantes en este contexto porque las XMPs parecen estar atravesando actualmente un evento de acreción de gas. El objetivo de esta tesis es investigar objetos que puedan indagar en este proceso de acreción de gas en el Universo local y explorar varias posibilidades para restringir sus propiedades a través de observaciones. Con este objetivo, realizo diversos estudios. Primero, analizo las propiedades cinemáticas de nueve XMPs para saber si sugieren un evento reciente de acreción de gas. Derivo curvas de rotación y dispersión de velocidad a partir de los parámetros de la línea principal de $H\alpha$, obteniendo que las XMPs presentan movimientos turbulentos mayores que las velocidades de rotación y que las regiones HII parecen moverse de manera coherente. Por otro lado, las alas de la línea de $H\alpha$ presentan unas débiles componentes en emisión que parecen ser producidas por la expansión de estructuras en forma de concha. Del análisis de estas componentes obtengo masas de gas, tasas de pérdida de masa y fracciones de masa arrastrada. Resulta que las galaxias XMP son muy ineficientes en el uso del gas para formar estrellas, esto se demuestra por las grandes fracciones de masa arrastrada que mido. Para no agotar el gas de la galaxia, los flujos de salida de gas deben compensarse con flujos de entrada de gas.

Segundo, busco candidatos de galaxias locales para detectar a su alrededor el medio circumgaláctico (CGM) y el IGM. Para ello, busco galaxias con estructuras no simétricas respecto al eje mayor de la galaxia en las imágenes profundas del proyecto *IAC Stripe 82 Legacy Project*. Las más interesantes primero se seleccionaron y luego se clasificaron según criterios morfológicos. Una de ellas fue seleccionada para una observación como prueba de concepto utilizando el *Gran Telescopio Canarias* (GTC). La observación se basó en la obtención de imágenes profundas para detectar la emisión débil y difusa de $H\alpha$ en el CGM de la galaxia. La estrategia de observación y el proceso de reducción estuvieron orientados a reducir el ruido producido por la emisión del cielo, que es nuestro principal obstáculo. Uno de los resultados de este estudio es la detección de objetos con líneas de emisión alrededor de la XMP. Estos objetos detectados no siguen una distribución uniforme, sino que se disponen a lo largo de determinadas direcciones respecto a la galaxia XMP. También detecto un halo de emisión de bajo brillo superficial alrededor de la XMP. En este trabajo analizo estas detecciones en términos del gas en el CGM y el IGM.

Tercero, exploro la relación entre las galaxias XMP y las galaxias ultradifusas. Como hay galaxias que están atravesando eventos de acreción de gas, debería haber galaxias entre esos eventos: galaxias que comparten las propiedades de un anfitrión de XMP pero sin un estallido de formación estelar pobre en metales. Estas galaxias eran desconocidas hasta ahora. Analizo los espectros de GTC de la galaxia ultradifusa UGC2162 que muestra todas las propiedades para ser una de esas galaxias.

Tesis disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/17639>

Minería de datos en la misión Gaia: visualización del catálogo, optimización del procesado y parametrización de estrellas

Autor: Marco Antonio Álvarez González
(marco.antonio.agonzalez@udc.es)

Tesis doctoral dirigida por: José Carlos Da-
fonte Vázquez y Minia Manteiga Outeiro

Centro: Universidade da Coruña

Fecha de lectura: 16 de septiembre de 2019

El trabajo realizado en esta tesis se enmarca en el proyecto *Gaia* de la Agencia Espacial Europea (ESA), cuyo objetivo es medir y procesar los datos sobre posiciones y brillos de más de mil millones de estrellas para generar el catálogo estelar más grande conocido hasta la actualidad, lo que lo convierte en un gran reto para toda la comunidad científica tanto desde el punto de vista computacional como astrofísico.

Para llevar a cabo el procesado y análisis de los datos de *Gaia* se formó un consorcio internacional, denominado *Data Processing and Analysis Consortium* (DPAC), destinado a diseñar e implementar los mecanismos que permiten explotar la ingente cantidad de información que el satélite está obteniendo en la actualidad y que, se estima, será del orden de un Petabyte al final de la misión. Está formado por más de 400 científicos e ingenieros entre los que nos incluimos los miembros del grupo de investigación en el que desarrollé esta tesis.

Nuestro trabajo se basa principalmente en la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial sobre los datos proporcionados por *Gaia*, así como en la elaboración de herramientas que permitan a la comunidad científica utilizar esas técnicas para analizar la información astrofísica que contiene el catálogo.

Concretamente, los objetivos que se pretenden con este trabajo son los siguientes:

- Aplicar técnicas de aprendizaje supervisado para la estimación de los principales parámetros atmosféricos para las estrellas en las que el instrumento RVS de *Gaia* medirá

espectros con suficiente relación señal a ruido: temperatura efectiva, gravedad superficial, metalicidad y abundancia de elementos alfa respecto al hierro. En esta tesis hemos podido validar satisfactoriamente el funcionamiento de nuestro algoritmo con medidas del instrumento RVS a disposición para el consorcio DPAC.

- Proporcionar a la comunidad científica una herramienta útil para la búsqueda y análisis de conjuntos de datos homogéneos, en el sentido de similitud de sus distribuciones espectrales de energía (SED) obtenidas con *Gaia*, mediante la aplicación de un algoritmo de aprendizaje no supervisado. Esta herramienta permite clasificar volúmenes gigantescos de datos por lo que la optimización del tiempo de cómputo del algoritmo es un factor esencial. Se explican las técnicas que permiten a esta herramienta procesar millones de datos en un tiempo reducido.
- Desarrollar una herramienta que facilita el análisis de los resultados obtenidos por la técnica de clasificación sobre millones de objetos estelares, permitiendo visualizar desde diferentes perspectivas las diferentes clases de estrellas, lo que posibilita llevar a cabo un análisis estadístico y, en general, explorar sus características. Dado que esta herramienta trabaja en un entorno *Big Data* el tratamiento de los datos adquiere un papel primordial.

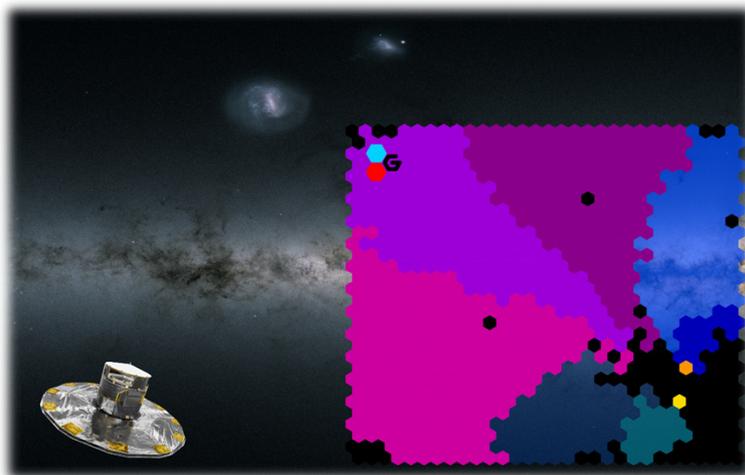
En todos los casos, la gran cantidad de datos a tratar sugiere la necesidad de aplicar técnicas de procesamiento distribuido para evitar un consumo de recursos excesivo (tiempo de ejecución y uso de memoria) que puede llegar a impedir una ejecución satisfactoria de los métodos propuestos. Procesar toda esta información en el marco del proyecto *Gaia* requiere una capacidad de cómputo importante, por lo que para reducir estos tiempos se realizan optimizaciones mediante técnicas de computación distribuida, como es *Apache Spark*, y mediante técnicas de procesado gráfico, como es CUDA.

Otro aspecto importante es que el software resultante debe ser integrado dentro de las cadenas de ejecución existentes en DPAC y desplegado en los centros de procesado asociados, lo que requiere de un proceso de adaptación del *software* original para la plataforma de destino.

Por último, se demuestra la utilidad de la técnica de aprendizaje no supervisado en otros ámbitos diferentes al de la astrofísica, demostrándose por ejemplo que es capaz de mejorar la detección de intrusiones en tráfico de redes de comunicaciones o que puede servir de ayuda en la generación de perfiles de usuarios para mejorar aplicaciones de marketing online.

Tesis disponible en:

<https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/23974>



Mapa SOM representando una clasificación estelar por tipo espectral generada con nuestra herramienta GUASOM, sobre un fondo de la Vía Láctea generado con los datos de la DR2 de Gaia.

La estructura y la población estelar del Bulbo Nuclear de la Vía Láctea

Autor: Francisco Nogueras-Lara

Tesis doctoral dirigida por: Rainer Schödel y Antonio María Alberdi Odriozola

Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)

Fecha de lectura: 23 de septiembre de 2019

El centro de la Vía Láctea constituye un objetivo fundamental para la astrofísica, puesto que es el núcleo galáctico más cercano (~ 8 kpc desde la Tierra) y el único donde es posible estudiar estrellas individuales con alta resolución angular. Es una región extrema, cuyo centro se halla ocupado por un agujero negro supermasivo, Sgr A*, que además constituye el entorno estelar más prolífico en nuestra galaxia. Sin embargo, a pesar de su extraordinaria importancia, solo $\sim 1\%$ de su área total ha sido estudiada con la suficiente resolución angular y cobertura en diferentes longitudes de onda para analizar su estructura y población estelar.

El objetivo fundamental de esta tesis consiste en la elaboración, publicación y análisis de un catálogo de estrellas, GALACTICNUCLEUS, que permita un estudio detallado con alta resolución angular (0.2 arcsec) de la población estelar del bulbo nuclear de la Vía Láctea en el infrarrojo cercano (bandas JHKs). Para ello se ha utilizado el instrumento HAWK-I situado en el UT4 del VLT (ESO, Paranal-Chile). El catálogo cubre una región total de ~ 0.3 grados cuadrados ($\sim 6,000$ pc²) localizados en el bulbo nuclear, el bulbo interno Galáctico y la región de transición entre ellos. La figura muestra la imagen obtenida para la región central. Durante la tesis doctoral, se ha llevado a cabo el proceso completo desde la elaboración de la estrategia de observación hasta la primera publicación de los datos del catálogo. Además, se ha desarrollado un procedimiento para la reducción de los datos y la obtención de fotometría y astrometría precisas.

Como resultado directo, se muestran y analizan los diagramas color-magnitud obtenidos para las regiones en el catálogo. Se distinguen claramente la población estelar perteneciente al camino desde la Tierra al Centro Galáctico (CG), la acumulación de la rama asintótica gigante, la post-secuencia principal, la rama ascendente gigante, el llamado "red clump" y la acumulación de estrellas de la rama gigante roja.

Posteriormente, se analiza la curva de extinción hacia el CG en el rango infrarrojo cercano para el campo central de GALACTICNUCLEUS. Obtenemos un índice de extinción $\alpha = 2.30 \pm 0.08$. Además, creamos y publicamos mapas de extinción para corregir la extinción diferencial en las regiones estudiadas. A continuación, utilizamos la región central del bulbo nuclear para analizar en detalle la variación de α con la línea de visión y su dependencia con la extinción y la longitud de onda. Solo observamos una variación significativa de α en función de la longitud de onda considerada: $\Delta\alpha = 0.20 \pm 0.05$ entre α_{JH} y α_{HKs} . Por lo tanto, se pone de manifiesto que la aproximación de la curva de extinción como ley de potencias no es válida. También se obtienen los valores concretos: $\alpha_{JH} = 2.43 \pm 0.03$ y $\alpha_{HKs} = 2.23 \pm 0.03$. Puesto que pequeñas diferencias en el índice de extinción alteran significativamente las distancias derivadas usando el módulo de distancia, nuestros resultados podrían cambiar la visión que se tiene actualmente de la región más interna de la Vía Láctea.

A continuación se analiza la población estelar de la región más interna del CG utilizando el campo central de GALACTICNUCLEUS. Estimamos que la mayoría de estrellas presentan metalidades de solar a supersolar. Posteriormente se calcula la historia de formación estelar del bulbo nuclear (BN) mediante el ajuste de modelos a la función de luminosidad en banda Ks. Obtenemos que un 80% de la masa estelar se formó hace > 8 Gyr. Esta formación inicial fue seguida de un periodo de ~ 6 Gyr en el que apenas tuvo lugar formación estelar, hasta hace ~ 1 Gyr en el que se formó un 5% de la masa del BN en apenas 100 Myr. La formación estelar continúa en menor medida hasta el momento presente. El evento hace ~ 1 Gyr es probablemente el más energético en la historia de la Vía Láctea con $\geq 2 \cdot 10^5$ supernovas. Nuestros resultados contradicen el hasta ahora aceptado paradigma de formación estelar cuasi-constante/cuasi-continua en el BN.

Finalmente, analizando la función de luminosidad en banda Ks para dos regiones en el bulbo interno, encontramos que la población estelar es vieja (> 12 Gyr) y rica en metales (alrededor del doble de la metalicidad solar).

Las líneas futuras del trabajo incluyen:

- La publicación de mapas de extinción y el análisis de la curva de extinción para todo el catálogo.
- La identificación de estrellas jóvenes usando el exceso de emisión para longitudes de onda corta. Estas estrellas pueden trazar cúmulos jóvenes disueltos.
- La búsqueda de cúmulos disueltos mediante ajuste de la función de luminosidad de regiones reducidas.
- El estudio de movimientos propios de las fuentes del catálogo usando una segunda época de observaciones o datos de HST.

Tesis disponible en: <https://www.iaa.csic.es/tesis>



Imagen en falso color de la región central de GALACTICNUCLEUS.

Inversiones de CO₂ en la termosfera diurna de Marte a partir de emisiones limbo en 4.3 μm

Autor: Sergio Jiménez-Monferrer

Tesis doctoral dirigida por: Miguel Ángel López-Valverde y Bernd Funke

Centro: Universidad de Granada (lectura en IAC)

Fecha de lectura: 4 de octubre de 2019

A pesar de la importancia de la termosfera, es quizá la región menos conocida de la atmósfera marciana. La mayor parte de la información que tenemos sobre estas alturas proviene de fuentes muy dispersas e inconexas entre sí. Entre ellas, unos pocos perfiles tomados *in situ* durante el descenso de algunas misiones, como *Viking 1* y *2*, las maniobras de aerofrenado de las misiones *Mars Global Surveyor* y *Mars Reconnaissance Orbiter*, el instrumento SPICAM a bordo de *Mars Express* y los instrumentos a bordo de la misión MAVEN. Estas medidas permitieron obtener perfiles de densidad y temperatura y estudiar la variabilidad estacional y geográfica de la termosfera. Según estas observaciones y las simulaciones numéricas de las mismas, la termosfera de Marte es una región compleja y dinámica, fuertemente acoplada a las capas inferiores. En concreto, los efectos causados por las tormentas de polvo y la variabilidad térmica en la baja atmósfera se propagan hacia arriba, llegando hasta la termosfera. Para comprender esta región hace falta, por lo tanto, una visión global de la atmósfera, desde las interacciones con la superficie hasta los intercambios de especies con la exosfera.

Los datos termosféricos disponibles presentan una cobertura temporal y geográfica limitada. Algunos efectos importantes, como la influencia de la actividad solar, son difíciles de entender con dichos datos. La mayoría de ellos, excepto las medidas de aerofrenado, se concentran en la parte nocturna del planeta, lo que deja la termosfera diurna prácticamente inexplorada. Durante el día es cuando se producen las emisiones atmosféricas no térmicas más fuertes en el infrarrojo. Estas emisiones infrarrojas ofrecen una interesante oportunidad para el sondeo remoto a dichas alturas en los planetas terrestres. De hecho, existen observaciones termosféricas de Marte en el infrarrojo, pero esos datos no han sido explotados suficientemente hasta la fecha debido a la complejidad de su interpretación física y la dificultad numérica de la inversión matemática necesaria. Estas observaciones fueron obtenidas por dos instrumentos a bordo de *Mars Express*: OMEGA y PFS. Se espera que su análisis proporcione un conocimiento más amplio y profundo sobre la termosfera diurna a las alturas de su máxima sensibilidad.

Como hilo conductor entre las misiones *Mars Express* y *ExoMars* (que comienza a producir los primeros resultados científicos), el proyecto europeo UPWARDS (*Understanding Planet Mars With Advanced Remote-sensing Datasets and Synergistic Studies*) arrancó en 2015, en el marco del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea. UPWARDS tenía como objetivo componer una imagen global de Marte, desde el subsuelo hasta la alta atmósfera. El proyecto UPWARDS abarcaba el desarrollo de nuevas herramientas científicas para el análisis de datos orbitales, como los que se esperan de

ExoMars, así como el estudio de datos existentes no explotados, como los proporcionados por *Mars Express*. El trabajo presentado en esta tesis ha sido parcialmente financiado por UPWARDS. Hemos analizado las emisiones infrarrojas de CO₂, en la región alrededor de 4.3 μm, obtenidas por OMEGA en geometría limbo en la termosfera diurna de Marte, con el objetivo de inferir información sobre parámetros atmosféricos fundamentales, como densidad y temperatura. Estas emisiones se producen por fluorescencia de la radiación solar por parte del CO₂ y es necesario incorporar condiciones de no ETL. Hemos realizado la calibración radiométrica de los datos proporcionados por OMEGA, limpiado los espectros disponibles, incluyendo el uso de técnicas de agrupamiento, y generado perfiles verticales de radiancia para cada conjunto de datos orbitales. La distribución y la geometría de los espectros obtenidos por OMEGA son altamente heterogéneas, dando lugar a proyecciones muy diferentes en el limbo de la atmósfera marciana. Por este motivo, se estableció una serie de criterios geométricos para facilitar una posterior comparación consistente entre los resultados de las inversiones.

Tras generar los perfiles verticales de radiancia, hemos aplicado un esquema de inversión no ETL basado en un esquema ampliamente validado para la Tierra, que adaptamos a condiciones marcianas. En este trabajo se presenta la configuración de la inversión y una discusión sobre los perfiles de densidad de CO₂ invertidos. También se formaron un total de 742 perfiles a partir de las 47 órbitas de OMEGA con observaciones en geometría limbo previamente seleccionadas. La convergencia alcanzada para el conjunto de todos los datos fue del 94%, resultado que puede considerarse muy satisfactorio. A partir de las densidades de CO₂ invertidas derivamos perfiles de temperatura, asumiendo equilibrio hidrostático. Para ello, usamos un algoritmo desarrollado a tal efecto. Para el 60% de las órbitas analizadas, encontramos un mínimo en el perfil de temperaturas a 140–150 km, lo que indica una termosfera más fría que la del modelo empleado, el LMD-MGCM. Por el contrario, en el 30% de las órbitas se obtuvo una termosfera más caliente que la predicha por el modelo.

Se incorpora también un estudio exhaustivo de sensibilidad del esquema de inversión. Hemos encontrado que, en general, la incertidumbre debida a la calibración de la ganancia instrumental y la inherente al error de la inversión son de especial importancia, mientras que la influencia de las temperaturas en la atmósfera de referencia usada como a priori, tomada de nuestro modelo de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés), es menor. Según nuestro estudio, los perfiles de CO₂ se pueden derivar con una precisión de aproximadamente 20% y una resolución vertical de unos 15 km entre 120 y 160 km de altura tangente.

Finalmente, hemos comparado los perfiles de densidad y temperatura obtenidos con las predicciones del LMD-MGCM y con los resultados proporcionados recientemente por otros instrumentos que estudian la termosfera marciana. La mayoría de las observaciones provenientes de otros experimentos, como medidas *in situ* de NGIMS o remotas de IUVS (ambos a bordo de MAVEN), tienen incertidumbres del mismo orden que las presentadas en este trabajo. Los resultados de dichos experimentos también ponen de manifiesto diferencias importantes cuando se comparan al LMD-MGCM o a otros modelos de circulación general. Dicha comparación global con las simulaciones numéricas indica una variabilidad atmosférica en consonancia con la encontrada también en nuestros datos de OMEGA. Este resultado apunta a la necesidad de validación de modelos globales a alturas termosféricas.

Tesis disponible en:

<https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=1791123>

El 3.6 m de ESO, en La Silla, con el centro galáctico en el fondo. Este telescopio opera actualmente con el espectrógrafo HARPS, el "cazador" de exoplanetas más preciso del mundo.
Créditos: ESO/S. Brunier



**Sociedad Española
de Astronomía**

Universidad de Barcelona,
Facultad de Física
Av. Martí Franquès, 1
Barcelona 08028

Tfno: +34 91 394 5249
Fax: +34 91 394 5051