



SEA

Sociedad Española de Astronomía



Portada: Última imagen completa de la superficie del asteroide Dimorphos, tomada por el módulo impactor DRACO 2 segundos antes del impacto.
Créditos: NASA/Johns Hopkins APL.

Comité editorial:

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

Maquetación:

Fernando J. Ballesteros Roselló

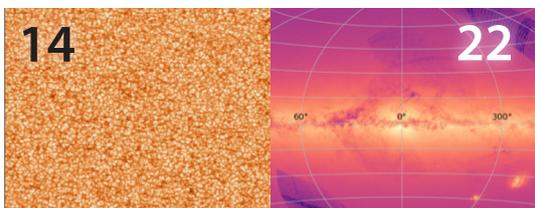
Sociedad Española de Astronomía SEA

www.sea-astronomia.es

Comisión de Información

comi-info@sea.am.ub.es

CONTENIDOS



- 5 Editorial
- 6 Evitar lo inevitable: La misión DART, un experimento para desviar asteroides
- 14 SOLAR ORBITER y la participación española
- 22 Gaia-DR3: Los 219 millones de espectros BP/RP
- 26 Gaia-DR3: El primer catalogo de AGN variables de Gaia
- 32 Tres son compañía
- 38 El Camino de Santiago: astronomía, cultura y patrimonio
- 44 TARSIS, espectroscopia bidimensional de gran campo para Calar Alto
- 54 Astronomía profesional con impulso amater. Informe situación Proam 2021
- 60 Ecos de (la) Sociedad
- 62 Libros
- 64 Tesis doctorales

La defensa planetaria contra los asteroides, hasta ahora una idea propia de la ciencia ficción, más cerca de ser una realidad.
Crédito: Igor Esaulov, en Deviant Art.



En este nuevo número del boletín pareciera que nos hemos lanzado a la ciencia ficción, pero a veces la realidad supera la ficción, y este es el caso de algunas de las nuevas misiones y resultados científicos. Isabel Herreros y Jens Ormø nos cuentan de primera mano cómo se ha desarrollado la misión DART, un hito tecnológico con la que sin duda muchos hemos fantaseado.

De la mano de Javier Rodríguez-Pacheco y Jose Carlos del Toro, nos llegan los primeros resultados de la misión Solar Orbiter. La batería de instrumentos a bordo de esta nueva misión solar sin duda la convierte en una herramienta única para conocer la heliosfera del astro rey.

Contamos con dos artículos sobre el tercer catálogo de la misión Gaia. La cantidad y calidad de los datos proporcionados por la misión hasta ahora ha roto todos los esquemas, y este tercer catálogo vuelve a batir un nuevo record. En este boletín el equipo de Gaia nos acerca los detalles de los millones de espectros tomados. Así mismo nos presentan también el primer catálogo de AGN variables producido a partir de datos de Gaia.

Pablo Rodríguez Gil nos sumerge en el fascinante mundo de las viudas negras estelares. Nos presenta estrellas de neutrones que viven en sistemas únicos. En particular, un sistema triple de periodo orbital corto que hace tambalear los modelos teóricos.

La astronomía ha estado ligada a la cultura de los pueblos desde la antigüedad, y el desarrollo del Camino de Santiago no es una excepción. Maitane Urrutia, Juan A. Belmonte y César González nos presentan algunos de los resultados que han obtenido de su novedoso estudio de los templos a lo largo del Camino.

Sin duda, el desarrollo instrumental es fundamental para poder seguir avanzando. En este boletín abordamos TARSIS, una unidad de campo integral de gran campo y con una cobertura espectral sin precedentes, que será instalado en el observatorio de Calar Alto. Armando Gil, Jorge Iglesias y Patricia Sánchez nos cuentan los detalles.

La comisión ProAm nos presenta el informe de 2021 sobre la situación actual en España, con el fin de entender mejor la colaboración desarrollada entre astrónomos profesiones y amateurs.

Además de estos temas, encontrará como siempre las secciones de Ecos de Sociedad, las reseñas de dos libros apasionantes y los resúmenes de las tesis doctorales.

¡Feliz solsticio!

Pepa Becerra González
Instituto de Astrofísica de Canarias
Universidad de La Laguna

EVITAR LO INEVITABLE: LA MISIÓN DART,

Desde los albores de la humanidad el hombre se ha sentido sobrecogido al levantar la mirada en la oscuridad de una noche estrellada. Son muchos, y muy antiguos, los registros gráficos relacionados con cometas, estrellas fugaces y meteoritos, que inspiraron en nuestros antepasados a la vez miedo y curiosidad. Todos nos hemos preguntado en algún momento, al ver pasar ante nuestros ojos una estrella fugaz, qué pasaría si ese objeto fuera más grande, o si cayera junto a nosotros. Esta sensación de vulnerabilidad se acrecentó aún más, si cabe, con las primeras evidencias científicas de que eventos catastróficos de este tipo podrían haber ocasionado extinciones masivas en el pasado de nuestro planeta, como el que marcó el comienzo de la era Cenozoica.



Isabel Herreros

isabel.herreros@cab.inta-csic.es

Jens Ormö

ormoj@cab.inta-csic.es

Centro de Astrobiología, CSIC-INTA

Muchas obras cinematográficas han fantaseado con la posibilidad de defendernos de esta amenaza cósmica, mostrando cómo, llegado el momento, la humanidad saldría airoso de una situación como esta, pero ¿está esto tecnológicamente a nuestro alcance? Los asteroides son cuerpos celestes que, si bien tienen un tamaño muy reducido, se mueven a gran velocidad, por lo que incluso objetos relativamente pequeños, atravesando nuestra atmósfera e impactando contra el suelo, liberarían la energía equivalente a varios miles de bombas como la de Hiroshima. ¿Cuenta la humanidad hoy día con el conocimiento y la tecnología suficiente como para desviar un asteroide potencialmente peligroso para la supervivencia de nuestra especie? A esta pregunta ha dado respuesta recientemente la misión DART.

EL OBJETIVO DE LA MISIÓN

La misión DART de la NASA surge alrededor de 2015 con la idea de ser el primer experimento a escala planetaria que permita probar si con la tecnología disponible es posible desviar de su trayectoria un objeto celeste. El objetivo final de esta misión consistía en poner a punto una metodología que permitiera en el futuro desviar un asteroide potencialmente peligroso para la Tierra. Para ello, en noviembre de 2021, se lanzó una nave espacial, de apenas media tonelada, que viajaría varios meses a través del espacio, para finalmente impactar contra el pequeño satélite, Dimorphos, de un sistema binario de asteroides próximo a la Tierra, Didymos 65803.

UNA MISIÓN ÚNICA

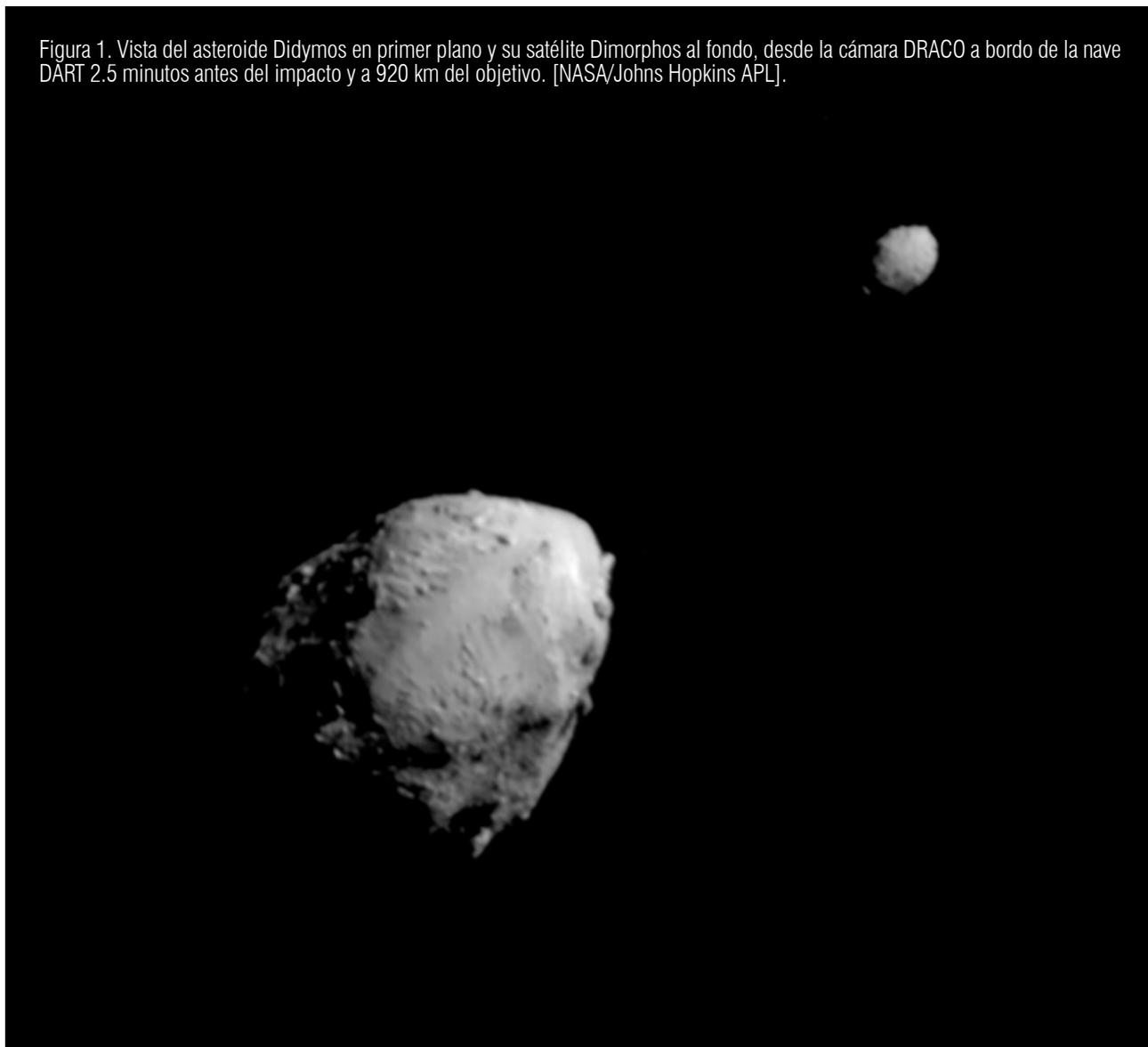
No es la primera vez que el hombre envía un artefacto al espacio. Hasta la fecha, se han enviado misiones tripuladas a la Luna, se ha conseguido aterrizar en Marte varias veces, incluso se han recogido muestras de un pequeño asteroide (misión Hayabusa, 2003). La nave Voyager 1 (lanzada en los años 70) está ya camino del espacio interestelar... No obstante, hasta ahora el hombre ha explorado el espacio sin interferir en su comportamiento. Ha sido siempre un observador pasivo. Sin embargo, y por primera vez en la historia, el ser humano se enfrenta al gran reto de intervenir en el movimiento natural de un cuerpo celeste.

LA TRASCENDENCIA DE LA MISIÓN

En nuestro Sistema Solar hay multitud de asteroides y cometas, cuyas órbitas alrededor del Sol, o de otro planeta, interceptan continuamente la propia órbita

UN EXPERIMENTO PARA DESVIAR ASTEROIDES

Figura 1. Vista del asteroide Didymos en primer plano y su satélite Dimorphos al fondo, desde la cámara DRACO a bordo de la nave DART 2.5 minutos antes del impacto y a 920 km del objetivo. [NASA/Johns Hopkins APL].



de la Tierra, suponiendo un peligro para nuestra supervivencia. Estos objetos celestes cercanos a la Tierra se denominan NEOs (Near-Earth Objects).

El tamaño de un NEO puede variar entre unos pocos metros a varios kilómetros de diámetro, y sus consecuencias en caso de impacto contra la Tierra son muy distintas. Cuando un objeto cósmico está en curso de colisión con la Tierra, viajará con al menos 11 km/s (la velocidad de escape de la

Tierra), pero lo más habitual es que lo haga a unos 18 km/s. A estas velocidades extremadamente altas, el impacto con la atmósfera terrestre iniciará la explosión del objeto. Dependiendo de la resistencia del material, i.e., si se trata de un asteroide de hierro o rocoso, los objetos de unas decenas de metros pueden desintegrarse por completo y arder en la atmósfera (si bien una onda expansiva y/o térmica podría llegar a la superficie terrestre), o fragmentarse en trozos más pequeños que

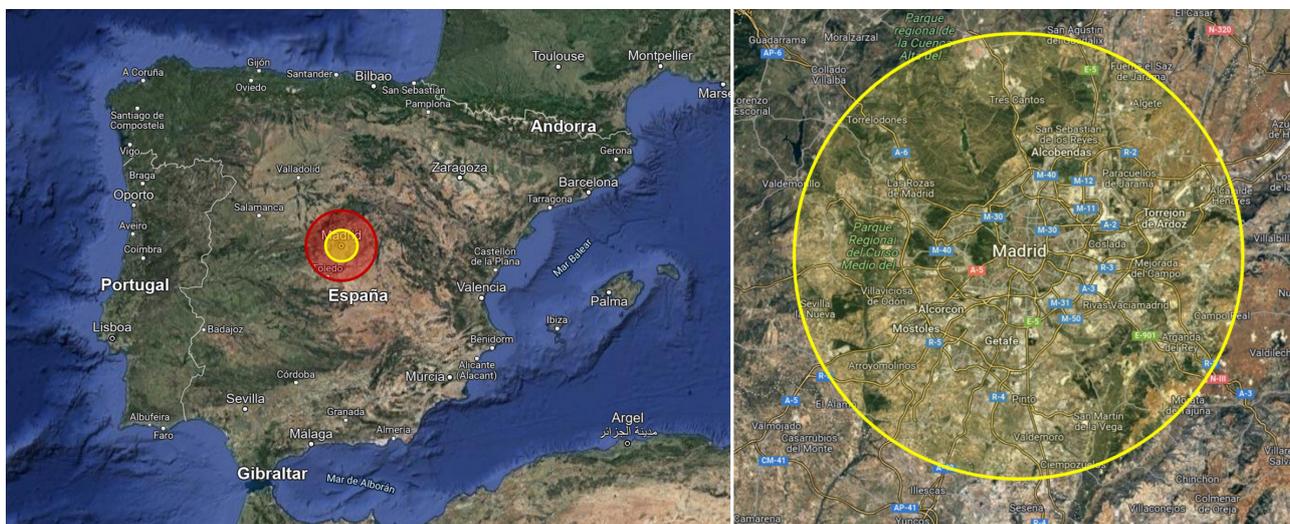


Figura 2. Ejemplo de colisión, en centro de la ciudad de Madrid, de un meteorito del mismo tipo y tamaño de Dimorphos: el círculo rojo en la figura superior muestra la extensión total afectada por la explosión; el círculo amarillo indica el área de devastación total. [Cálculos realizados con “Earth Impact Effects Program”].

llegarían al suelo con una velocidad muy reducida (pudiendo dar lugar a un grupo de pequeños cráteres de impacto). Si su tamaño es superior a unos 50-100 m, el objeto puede alcanzar la superficie con una velocidad cósmica mantenida (los objetos más pequeños suelen formar un grupo compacto), dando lugar a la formación de un cráter de impacto a hiper-velocidad de tamaño 10-15 veces mayor que el propio objeto. No obstante, el área afectada por la explosión de estos objetos al colisionar contra nosotros (i.e. aumento de presión y de temperatura, material eyectado a gran velocidad, terremotos, etc.) es mucho mayor que el tamaño del propio cráter, pudiendo ocasionar una devastación global, en el caso de un objeto de varios kilómetros de diámetro. Sin embargo, estos últimos son muy poco abundantes y su frecuencia de colisión contra la Tierra se estima en 1 cada 100-200 millones de años.

El tamaño de Dimorphos es de aproximadamente 160 m, pero a pesar de sus reducidas dimensiones, la colisión con un asteroide similar provocaría daños en un área equivalente a una provincia española (Figura 2), si bien el cráter resultante apenas tendría un kilómetro y medio de diámetro. Aunque la frecuencia

de colisión de un asteroide de este tamaño se estima en 1 cada 25000 años, existen aproximadamente 20000 NEOs de dimensiones similares potencialmente peligrosos para la Tierra. Es por esto que, ser capaces de desviar un asteroide con semejante potencial destructor marcaría sin duda un hito en la historia del desarrollo de nuestra tecnología espacial (Statler et al. 2022) y nos permitiría evitar las consecuencias de una amenaza inevitable.

LA CONFIRMACIÓN DE NUESTRA CAPACIDAD TECNOLÓGICA

La madrugada del pasado 27 de septiembre de 2022 (CET), la nave DART, tras una larga travesía de casi 10 meses, finalmente impactaba contra el asteroide Dimorphos. Una veintena de observatorios astronómicos situados alrededor del planeta confirmaban con sus observaciones la colisión. Y apenas unas horas después, se mostraba públicamente la primera imagen captada por una de las cámaras a bordo de la nave italiana LICIACube, compañera de travesía de DART (Figura 3).

Para poder medir la desviación de Dimorphos de su órbita natural mediante las observaciones de los telescopios terrestres, habría de medirse el cambio en el periodo orbital. Si el periodo orbital

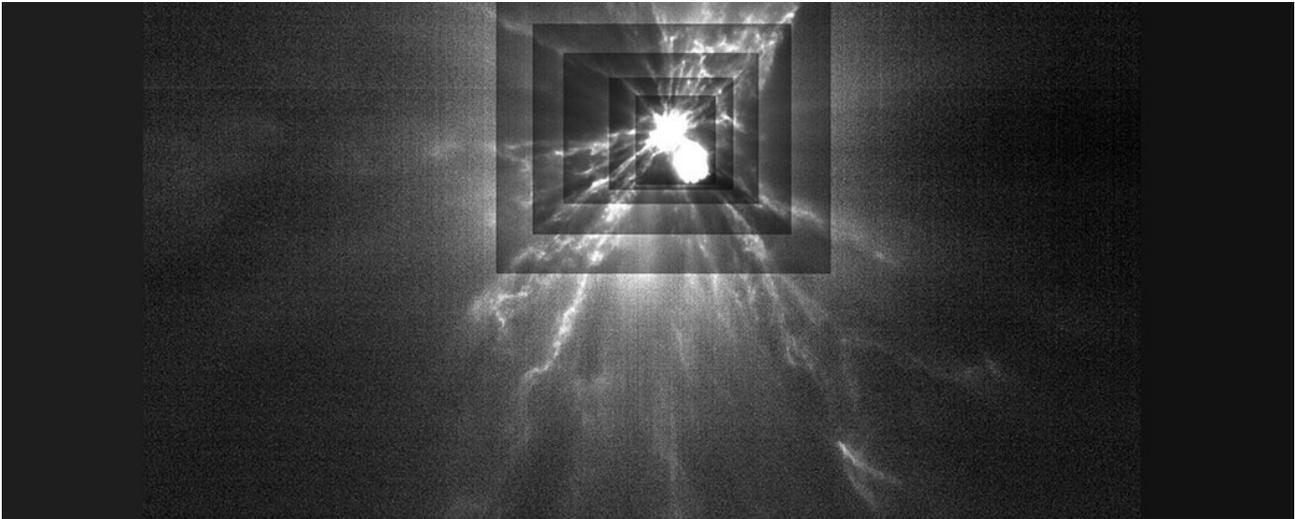


Figura 3. Imagen tomada por LICIAcube en el momento del impacto. Los recuadros han sido incluidos artificialmente a fin de aumentar el contraste en las distintas zonas de la imagen facilitando así la identificación de las estructuras filamentosas consecuencia del impacto. [ASI/NASA].

se redujera a consecuencia del impacto, esto significaría que Dimorphos se habría movido a una órbita interior más corta que la anterior, y la misión habría conseguido su objetivo.

Finalmente, el 11 de Octubre del 2022, apenas dos semanas después del impacto, la NASA anuncia oficialmente que el experimento a escala planetaria ha sido un éxito: el periodo orbital de Dimorphos se ha reducido en aproximadamente media hora (32 min), acercando Dimorphos al asteroide mayor una distancia de unos 22 metros.

DART Y EL LABORATORIO DE IMPACTOS DEL CENTRO DE ASTROBIOLOGÍA (CAB)

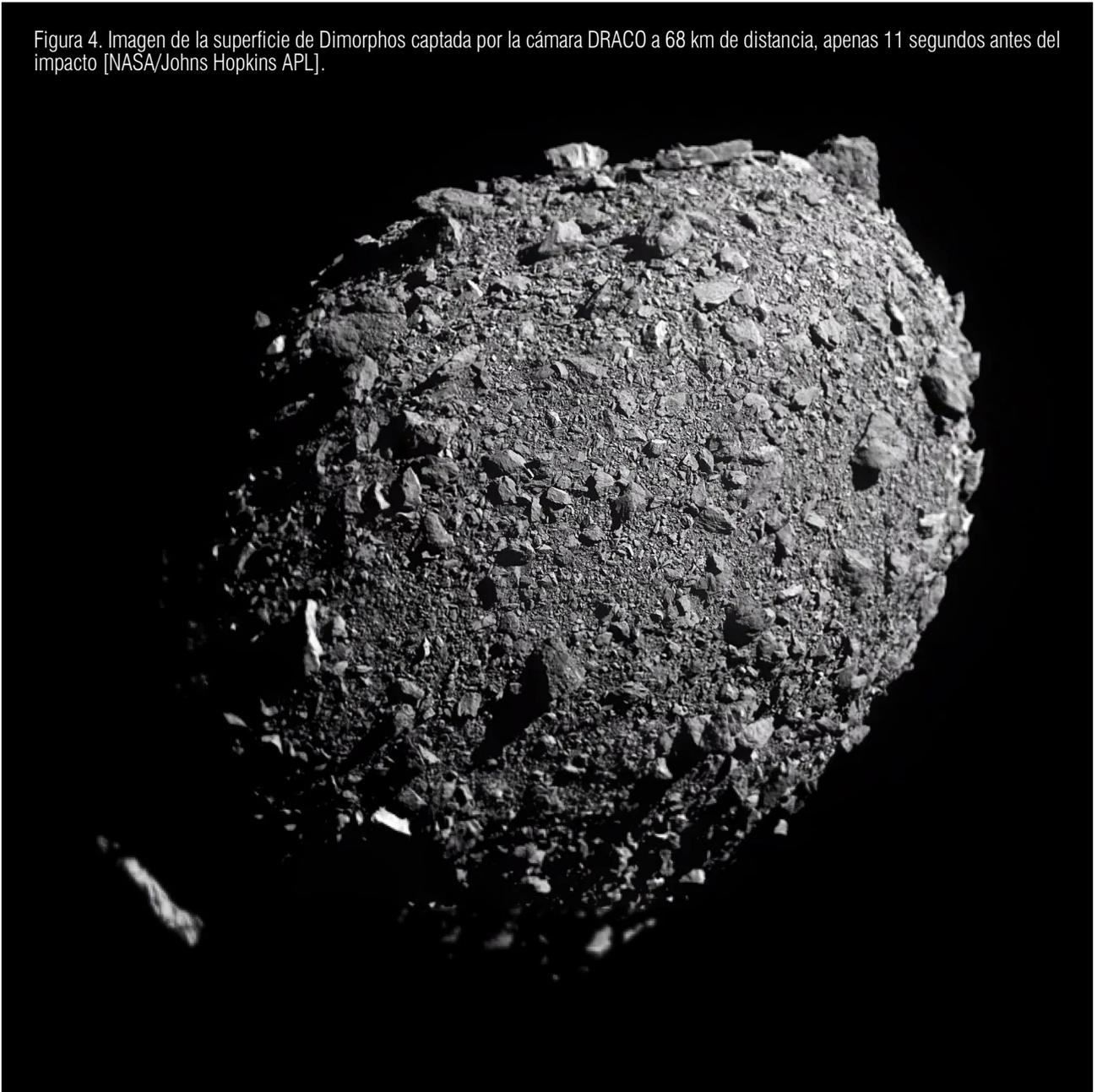
Las técnicas de cálculo numérico y simulación nos permiten reproducir cualquier proceso natural gobernado por una, o varias, ecuaciones matemáticas. Se han convertido en una forma muy eficiente de realizar “experimentos virtuales”, permitiendo el ahorro de los elevados costes de instalaciones y equipamiento de laboratorio. Lo que es más, los modelos numéricos nos permiten estudiar procesos físicos en condiciones extremas, en muchos casos irreproducibles en un laboratorio, como es el caso del impacto de la misión DART, en condiciones de vacío y microgravedad.

No obstante, para que los resultados de un modelo sean realmente fiables, hay que validarlo comparando los resultados numéricos con experimentos reales. Es por este motivo que el Laboratorio de Impactos del CAB ha jugado un papel tan relevante en la misión DART, pues en él se han realizado los ensayos de validación de algunos de los modelos numéricos utilizados por el grupo de investigación de la misión (Stickle et al., 2022).

El Laboratorio de Impactos del CAB (Figura 5) fue diseñado por el Dr. Ormö y construido a principios de los años 2000 en las instalaciones del INTA. El laboratorio está concebido para experimentos de impacto a baja velocidad. Consiste en un cañón de gas comprimido de 20 mm de calibre que puede disparar proyectiles de diversos materiales y composición a velocidades de hasta 420 m/s con diferentes ángulos de inclinación.

Los experimentos se graban con dos cámaras de alta velocidad situadas a diferentes distancias y posiciones, y los cráteres resultantes se pueden escanear con posterioridad en 3D con resoluciones milimétricas. Una característica especial de este laboratorio es que los experimentos pueden realizarse en una

Figura 4. Imagen de la superficie de Dimorphos captada por la cámara DRACO a 68 km de distancia, apenas 11 segundos antes del impacto [NASA/Johns Hopkins APL].



configuración tal que se puede estudiar con detalle la formación del cráter en sección, lo cual resulta extremadamente útil a la hora de comparar los resultados experimentales con los de los modelos numéricos.

Los asteroides como Dimorphos, del tipo “pila de escombros” (o rubble-piles en inglés), consisten en un agregado heterogéneo de material rocoso y regolito. Este es el caso de otros asteroides objeto de anteriores misiones espaciales como Ryugu (misión Hayabusa 2, JAXA) y Bennu (misión OSIRIS-Rex, NASA).

La heterogeneidad de este tipo de objetos hace especialmente complicado predecir el efecto de la colisión haciendo uso de los modelos numéricos. Por ello son fundamentales los experimentos de laboratorio.

En el Laboratorio de Impactos hemos llevado a cabo varios experimentos teniendo en cuenta el efecto de la heterogeneidad, porosidad, cohesión y fricción del material objeto del impacto. Los experimentos se han realizado con velocidades de impacto de unos 400 m/s sobre un material compuesto por arena fina de playa y esferas cerámicas porosas de mayor tamaño embebidas en la arena en distintas configuraciones.

Los resultados de los experimentos confirmaron que la presencia de elementos de distinto tamaño en el material objeto de impacto tiene efecto tanto en la eyección de material como en la forma del cráter, disminuyendo la transferencia de momento, esto es, la eficiencia del impacto. Por otro lado, cuando no son golpeadas directamente por el proyectil, las esferas incorporadas

Figura 5. Laboratorio de Impactos del CAB: cámara de simulación de 7 m de diámetro (imagen izquierda) y cañón de aire comprimido de 20 mm de calibre con el que se realizan los disparos (imagen derecha) [Modificada de [Sturkell and Örmö, 2022](#)].



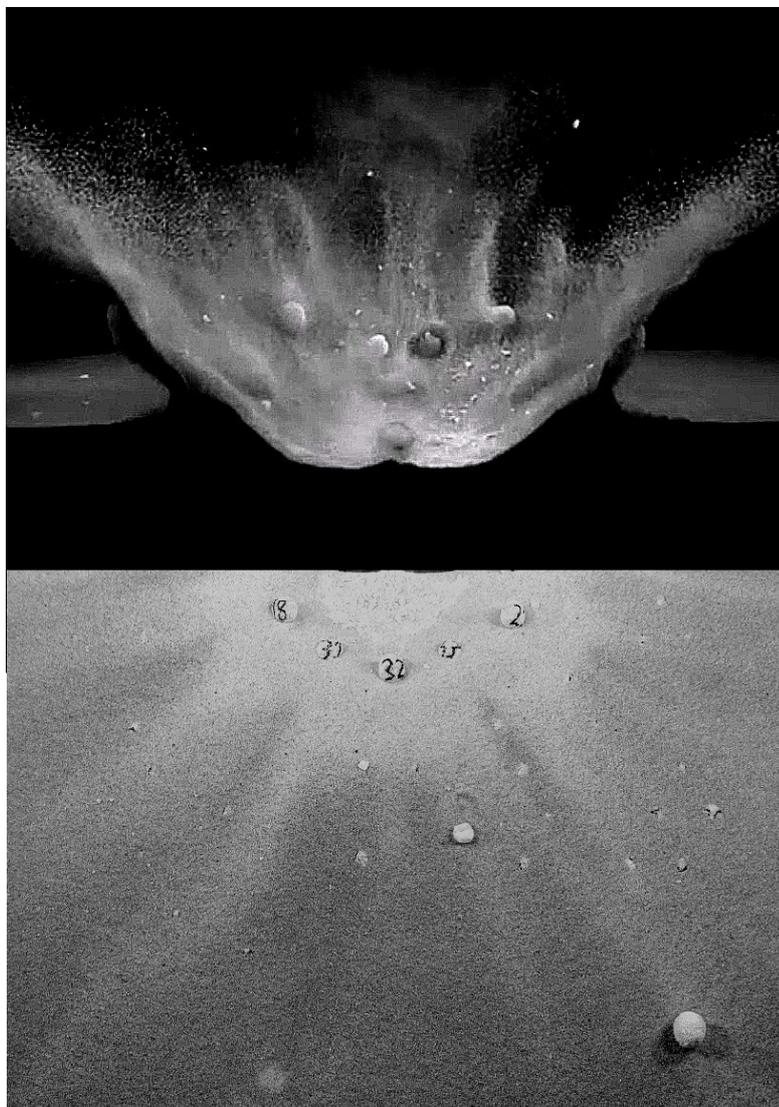
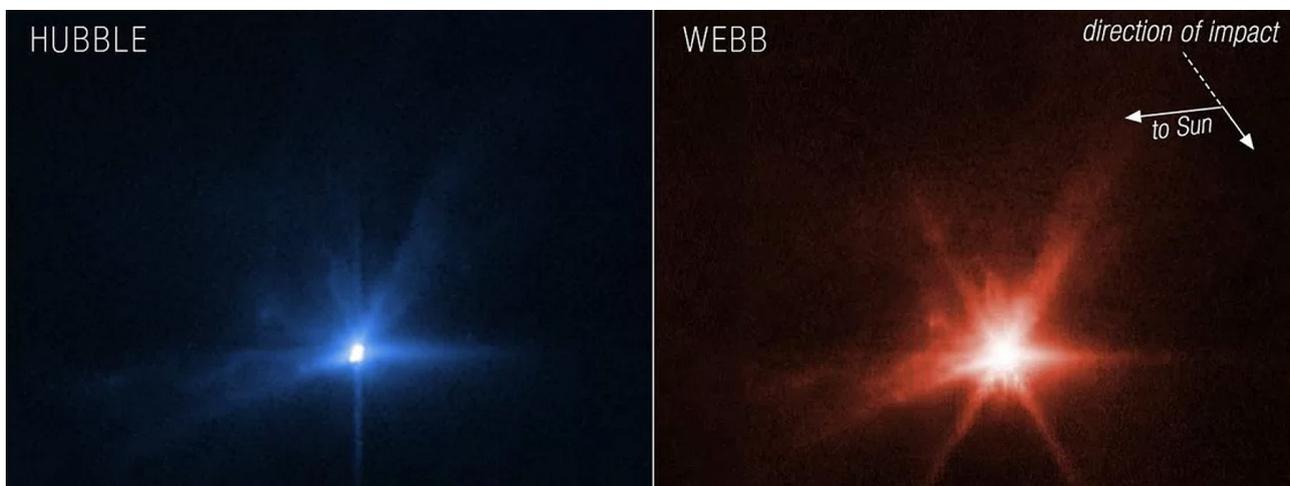


Figura 6. Experimento en el Laboratorio de Impactos del CAB: Vista lateral del impacto en material heterogéneo y formación de estructuras filamentosas en el material eyectado (imagen superior); sistema de rayos formado por la deposición del material expulsado durante el impacto (imagen inferior) [Imágenes modificadas de Ormö et al., 2022].

Figura 7. Imágenes tomadas por los telescopios espaciales HST (Hubble Space Telescope) y JWST (James Webb Telescope) en el momento del impacto [ASI/NASA, NASA, ESA, CSA, Jian-Yang Li (PSI), Cristina Thomas (Northern Arizona University), Ian Wong (NASA-GSFC)].



en la arena se desplazan, pero no se fragmentan. Esto sugiere que los impactos en este tipo de asteroides redistribuirán el material de su superficie, lo que podría resultar en la segregación de los componentes superficiales según su tamaño. Este resultado permite explicar los patrones de acumulación de elementos de mayor tamaño observados alrededor de los cráteres de Ryugu y Bennu, lo cual resulta útil para comprender el motivo de su aspecto actual.

Los experimentos llevados a cabo en el CAB, en el marco de la misión DART y cuyos resultados se han publicado en la revista científica "Earth and Planetary Science Letters" (Ormö et al., 2022), permitieron la validación de uno de los códigos más utilizados en la misión para simular el impacto DART (Bern SPH).

Además, gracias a los experimentos en materiales heterogéneos llevados a cabo en el Laboratorio de Impactos, fuimos capaces de observar y predecir la formación de las estructuras filamentosas (Figura 6) que meses más tarde fueron observadas en el momento del impacto DART tanto por el LICIAcube (Figura 3) como por los telescopios espaciales HST (Hubble Space Telescope) y JWST (James Webb Telescope) (Figura 7), consecuencia de la agrupación del material eyectado en forma de "rayos", debido a la diferencia de tamaño entre las partículas de la superficie del asteroide Dimorphos (Figura 4).

EL FUTURO DE LA MISIÓN

Una vez confirmada nuestra capacidad de defensa real ante la amenaza de un NEO del tamaño de Dimorphos, habrá que estudiar de forma exhaustiva los detalles del impacto, y comprobar hasta qué punto las predicciones de los modelos concuerdan con lo observado. Esto nos permitirá incrementar nuestro conocimiento sobre las leyes físicas que rigen la transferencia de momento en colisiones inelásticas con eyección de material, así como ahondar en nuestro conocimiento sobre la formación de los cráteres de impacto, uno de los accidentes geográficos más común en los cuerpos planetarios.

La forma y tamaño del cráter resultante en Dimorphos arrojará información detallada sobre la composición y comportamiento de este tipo de asteroides tan abundantes en nuestro Sistema Solar, lo cual es crucial para entender el origen de nuestro propio planeta.

Sin embargo, estos últimos datos no podrán obtenerse desde los observatorios terrestres. Será necesario enviar de nuevo una nave espacial hasta Dimorphos, para poder estudiar el resultado del impacto DART con detalle. Ese es el objetivo de la misión Hera, de la Agencia Espacial Europea (ESA), que enviará una nave de reconocimiento en 2024, la cual nos permitirá, tras su llegada a Dimorphos en 2026, seguir indagando en los resultados de la pionera misión DART.

REFERENCIAS

- Statler et al., 2022, "After DART: Using the First Full-scale Test of a Kinetic Impactor to Inform a Future Planetary Defense Mission", *Planet. Sci. J.* 3 244; <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac94c1>
- Stickle et al., 2022, "Effects of Impact and Target Parameters on the Results of a Kinetic Impactor: Predictions for the Double Asteroid Redirection Test (DART) Mission", *Planet. Sci. J.* 3 248; <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac91cc>
- Collins, Melosh and Marcus, 2010, "Earth Impact Effects Program – Damage Map Version", Copyright: Imperial College London; <https://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEarth/ImpactEffectsMap/> (acceso: 17/11/2022)
- Ormö et al., 2022, "Boulder exhumation and segregation by impacts on rubble-pile asteroids", *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 594, 15 September 2022, 117713; <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117713>
- Sturkell and Ormö, 2022, "Som ett skott i labbet", *Geologiskt forum*, 113: 4-9.

SOLAR ORBITER Y LA PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA

La misión SOLAR ORBITER (Müller, St. Cyr, Zouganelis, et al. 2020) comenzó su periplo el 10 de febrero de 2020, desde Cabo Cañaveral, en Florida. Un viaje inédito para la humanidad en el que las agencias espaciales europea (ESA, la cual ostenta el liderazgo) y americana (NASA) han colaborado estrechamente cerca de veinte años; un viaje al que le esperan todavía unas cuantas órbitas más: en concreto, dos por año, aproximadamente. SOLAR ORBITER no es el primer ingenio humano en orbitar alrededor del Sol, pero sí el primero en hacerlo con una batería de instrumentos que conjugan el sondeo remoto de la estrella con la medida local de las propiedades del medio interplanetario, el viento solar y las partículas energéticas que atraviesan la nave. Esta característica singular la capacita como una herramienta única para comprender el origen solar de todos los fenómenos y sucesos que tienen lugar en la heliosfera.



Javier Rodríguez-Pacheco
Universidad de Alcalá
fsrodriguez@uah.es



Jose Carlos del Toro Iniesta
Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC
jti@iaa.es

SOLAR ORBITER es quizá la primera misión espacial concebida para estudiar la heliosfera como un todo, como un único sistema cuyo “motor central” es el Sol. De hecho, el nudo gordiano que pretende ayudar a desatar corresponde al porqué y al cómo el Sol crea y controla la heliosfera y gobierna los fenómenos que ocurren en ella. Una pregunta con dosis ciertas de antropocentrismo y con notables proyecciones hacia nuestra vida en la Tierra (en el Sistema Solar): casi todo lo que ocurre en nuestro entorno espacial cercano tiene que ver, e incluso cuenta con su origen, en el Sol.

Con un órbita altamente elíptica y excéntrica, la nave tiene un perihelio de 0,3 au y un afelio de 1 au. Ninguna otra nave se ha acercado tanto a nuestra estrella salvo PARKER SOLAR PROBE de la NASA (Fox, Velli, Bale, S. D., et al. 2016), pero ésta sin instrumentos de observación solar remota (salvo una cámara de campo amplio); sólo cuenta con instrumentos de medida local. Con semejante perihelio, SOLAR ORBITER tiene capacidad de ofrecer resoluciones espaciales de la superficie solar que resultan competitivas con las que suministran los telescopios terrenos o en órbita terrestre más potentes. Pero, además, las órbitas se caracterizan por ir inclinándose progresivamente más con respecto al plano de la eclíptica. En sus puntos de máxima y mínima heliolatitud, los instrumentos de sondeo remoto van a tener una visión inédita de los polos, cuya inclinación con respecto a la normal de la eclíptica ($\leq 7^\circ$) impide su observación correcta desde nuestro planeta. Una observación ventajosa de los polos es importante por varias razones, pero, sobre todo, porque los campos magnéticos, fundamentalmente perpendiculares a la superficie solar, se infieren de forma más precisa cuando se los observa longitudinalmente por la especial sensibilidad de las líneas espectrales al efecto Zeeman. Los campos magnéticos polares resultan clave para entender los cambios de polaridad en cada ciclo de actividad de once años. Resultan cruciales, pues, para entender la actividad solar (y, con ésta, la de otras estrellas).

Para España, SOLAR ORBITER tiene connotaciones especiales puesto que es la primera misión del programa científico de la ESA en la que nuestro país ostenta liderazgo en dos instrumentos. El *Energetic Particle Detector* (EPD; Rodríguez-Pacheco, Wimmer-Schweingruber, Mason, et al. 2020), uno de los cuatro instrumentos de medida local, está liderado por Javier Rodríguez-Pacheco, de la Universidad de Alcalá (UAH), y coliderado por Robert Wimmer-Schweingruber, de la Universidad de Kiel. El

Polarimetric and Helioseismic Imager (Solanki, Del Toro Iniesta, Woch, et al. 2020) uno de los seis instrumentos de sondeo remoto, está liderado por Sami K. Solanki, del Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, en Gotinga, Alemania, y coliderado por Jose Carlos del Toro Iniesta, del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC). Además, el último jefe de proyecto de la misión hasta su lanzamiento fue también un español: César García Marirrodriga, y su actual jefe de misión es, de nuevo, otro español: Luis Sánchez Duarte. Estos dos últimos trabajan para la ESA. Dejando a un lado las cuestiones personales que pueden resultar anecdóticas, es cierto que nuestro país se ha implicado en un esfuerzo económico considerable, pero que ha resultado en una línea estratégica de desarrollo instrumental y tecnológico de primer orden el cual nos ha situado a los grupos y empresas españolas en la vanguardia internacional.

Coordinados por el IAA-CSIC, en el desarrollo de SO/PHI han participado el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), la Universitat de València (UV), la Universitat de Barcelona (UB), el Instituto “Ignacio da Riva” de la Universidad Politécnica de Madrid (IDR-UPM) y el Instituto de Astrofísica de Canarias. Por su parte, la UAH y, en concreto, dos de sus departamentos, ha sido la contribuyente española a EPD junto con el Instituto “Ignacio da Riva” mencionado anteriormente. Por último, la empresa española SENER Aeroespacial, además de participar significativamente en ambos instrumentos como veremos más abajo, es responsable de todo el sistema de antenas de comunicaciones de la nave, del mástil desplegable que alberga los cuatro instrumentos de medida local, así como de los *pasamuros*, interfaces huecas entre el escudo térmico de la nave y la plataforma principal en las que se albergan las ventanas calorífugas que protegen los instrumentos de sondeo remoto.

EL ENERGETIC PARTICLE DETECTOR

Para poder responder adecuadamente a las preguntas fundamentales de SOLAR ORBITER, se hace necesario un instrumento que determine las propiedades de las poblaciones de partículas energéticas solares en un amplio rango de energías, desde supratérmicas hasta de cientos de MeV; y además proporcione composiciones tanto elementales como isotópicas e información direccional. No existe ningún instrumento detector de partículas capaz, con una única unidad, de cumplir con todos estos requisitos, y además con aquellos relacionados con estar embarcado en una misión

espacial. Es por este motivo por lo que EPD está formado por varias unidades, cada una de ellas encargada de estudiar una determinada región del espectro de energías y una determinada especie nuclear. Además, el hecho de que la plataforma esté estabilizada en tres ejes, debido a los requisitos observacionales impuestos por los instrumentos de teledetección, hace necesario que a la hora de proporcionar la información direccional requerida para reconstruir funciones de distribución en 3D, la mayor parte de las unidades de EPD consten de varios sensores cada uno de ellos cubriendo un determinado campo de visión. En el consorcio internacional que ha desarrollado EPD han intervenido: el Space Research Group de la Universidad de Alcalá, la Christian-Albrechts-University, Kiel, Alemania y el Applied Physics Laboratory de la Johns Hopkins University de los Estados Unidos de América.

EPD está compuesto por las siguientes unidades:

- STEP: Suprathermal Electrons and Protons
- EPT: Electron and Proton Telescope (dos unidades)
- SIS: Suprathermal Ion Spectrograph (SIS)
- HET: High Energy Telescope (dos unidades)

Todas ellas comparten la Unidad de Control del Instrumento conocida como ICU que, además de servir de unidad central de procesamiento de datos, se encarga del suministro de potencia a las unidades.

La Figura 1 muestra los modelos de vuelo de todas sus unidades durante su integración en las instalaciones de SENER, en Tres Cantos, en julio de 2016.

La masa total de EPD es de 14,7 kg y su consumo promedio de potencia es de 21 W. Las pruebas realizadas durante la fase de crucero indican que EPD está funcionando perfectamente cumpliendo las previsiones realizadas durante su desarrollo (Prieto Mateo et al. 2021).

Todos los sensores de EPD contienen detectores de estado sólido y se basan en el hecho de que la energía de las partículas es proporcional a la carga depositada en los detectores cuando estas se detienen. La identificación entre electrones e iones se realiza gracias al uso de imanes (como en STEP y EPT) y la identificación de las distintas especies nucleares se logra combinando técnicas de “time of flight” (SIS) como el uso de detectores de estado sólido en configuración telescópica (HET). El rango de energías cubierto por cada uno de los sensores puede verse en el

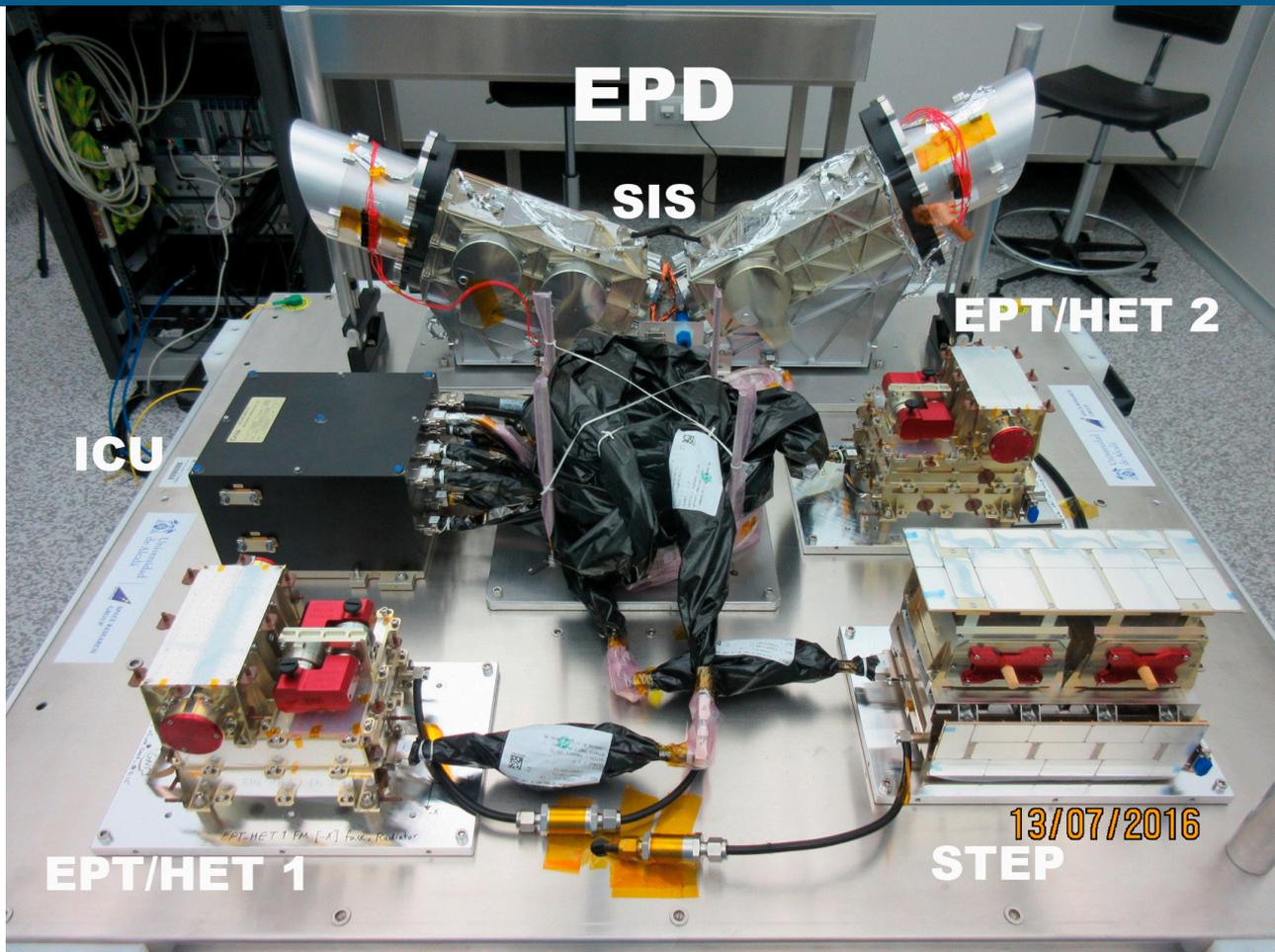
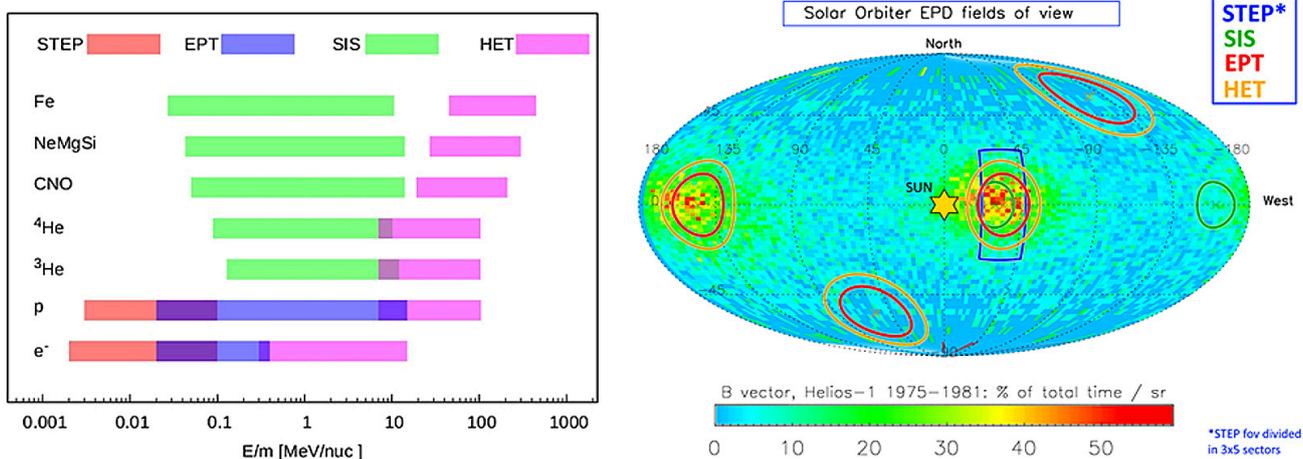


Figura 1. Modelo de vuelo de EPD durante las pruebas de integración (Rodríguez-Pacheco et al., 2021).

Figura 2. Rango energético cubierto por EPD (izquierda) y campos de visión de los distintos sensores. Nótese la acumulación alrededor de la zona de mayor probabilidad de encontrar el campo magnético interplanetario a 0,28 au. Figura adaptada de Rodríguez-Pacheco et al., 2021.



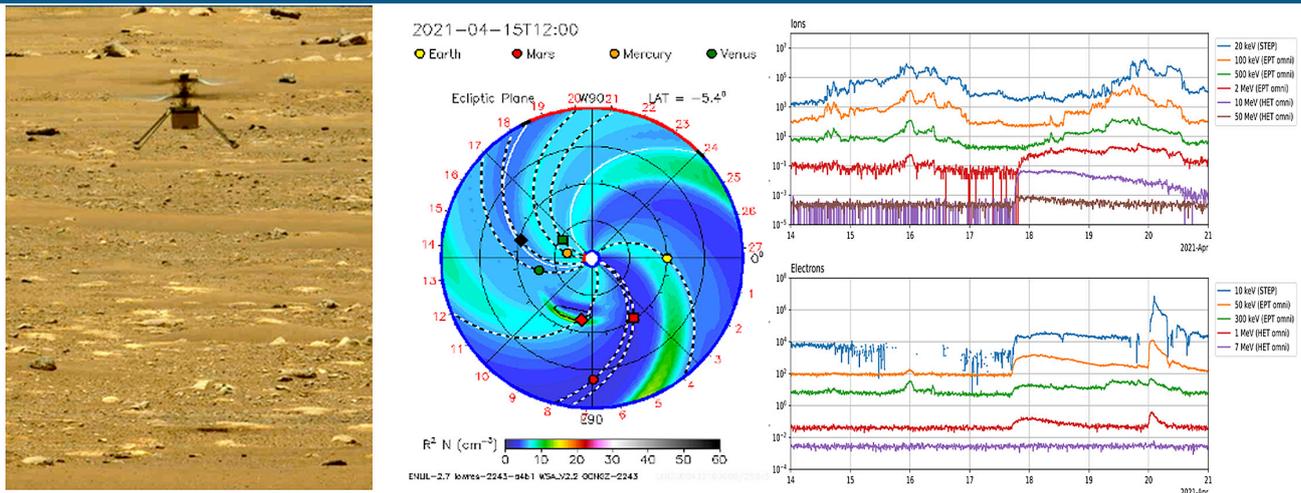


Figura 3. Segundo vuelo del INGENUITY sobre la superficie marciana (izquierda). Predicción del modelo ENLIL de la propagación asociada a la CME del 14 de abril de 2021 (centro) y flujos de iones y electrones de diversas energías medidos por EPD en el momento de la llegada de la onda de choque asociada a la CME (derecha). Créditos: NASA, WSA-Enlil Solar Wind Prediction and EPD/Solar Orbiter.

panel de la izquierda de la Figura 2. El panel derecho de esta misma figura muestra los distintos campos de visión de los sensores de EPD. El Sol se encuentra en el centro, marcado por una estrella amarilla de seis puntas, mientras que los colores más rojizos del fondo indican mayor probabilidad de encontrar el campo magnético a 0,3 au (y por tanto mayor probabilidad de llegada de las partículas cargadas).

LA CONTRIBUCIÓN ESPAÑOLA A EPD

A nivel institucional, la contribución española ha estado a cargo del Grupo de Investigación Espacial de la Universidad de Alcalá (SRG-UAH) y del Instituto “Ignacio da Riva” de la Universidad Politécnica de Madrid (IDR-UPM).

El grupo SRG-UAH se ha encargado de la coordinación de todo el desarrollo del instrumento EPD a través de la oficina de proyecto, así como del desarrollo de la Instrument Control Unit (ICU) de EPD incluyendo el desarrollo y verificación de su *software* de vuelo y del *firmware* de la FPGA. La oficina de proyecto se ha encargado de la ingeniería de sistemas, control de configuración, análisis estructural y térmico (a nivel instrumento) y del ensamblado, verificación, integración y cotejo (AIVT de sus siglas en inglés) del instrumento. Por su parte, la ICU es el único punto de conexión entre la nave y todas las unidades de EPD, sirviendo de interfaz tanto de datos como de potencia. La ICU está compuesta por la Common Data Processing Unit (CDPU) y la Low Voltage Power Supply (LVPS). Además, la ICU está encargada de activar los modos ráfaga tras la identificación a bordo de determinados sucesos en

los datos de EPD y de compartir esta información con otros instrumentos de la misión para activar, si fuese el caso, los modos ráfaga coordinados que han sido planeados durante el desarrollo de la misión.

Sus principales funciones son:

- Monitorizar y controlar de los sensores.
- Asignación de tiempos.
- Recolección, comprensión y empaquetado de los datos de EPD para su posterior telemetría a Tierra.
- Recepción y transmisión a los sensores de los telecomandos recibidos por la nave.

El diseño de la ICU se basa en la unidad Common Data Processing Unit (CDPU) de los instrumentos Comprehensive Suprathermal and Energetic Particle Analyzer “COSTEP” y de Energetic and Relativistic Nuclei and Electron “ERNE” a bordo de la misión SOHO de la ESA/NASA. Ha de destacarse que, con más de 27 años de operaciones en el espacio, la CDPU no ha sufrido ningún contratiempo, funcionando la unidad nominal de forma continuada salvo por las interrupciones asociadas a la propia misión. Este hecho puede dar una idea de la enorme fiabilidad que tienen las unidades desarrolladas por nuestro grupo.

Por su parte, el IDR-UPM estuvo a cargo de todo el diseño y el *hardware* térmico de todas las unidades de EPD. El grupo SRG-UAH al ser la entidad que acoge al Investigador Principal del instrumento, también es responsable en la actualidad de todos los procedimientos de operaciones del instrumento, así como de suministrar a la ESA todos los datos de

EPD, desde los datos nivel cero, hasta los datos de las medidas expresados en unidades físicas (L2).

La contribución de la industria española del sector se ha concentrado en las empresas SENER Aeroespacial y CRISA/AIRBUS. SENER ha dado soporte en todo momento a la oficina de proyecto, principalmente las actividades relacionadas con ingeniería de sistemas, así como del cableado del instrumento y la garantía de producto (PA). Por su parte CRISA/AIRBUS se ha encargado del diseño de la LVPS y de la fabricación del modelo de vuelo de la ICU.

PRIMEROS RESULTADOS DE EPD

La fase de crucero de la misión duró desde junio de 2020 a noviembre de 2021. Durante ese periodo se han realizado numerosas mediciones, particularmente de instrumentos *in situ*, cuyos resultados se publicaron en un número especial de la revista *Astronomy & Astrophysics*. Los trabajos publicados que hicieron uso de los datos de EPD se muestran en la Tabla 1. Como puede observarse, los temas cubiertos se refieren principalmente al campo de las partículas energéticas, pero los datos de EPD también han sido

cruciales para el estudio de la magnetosfera de Venus (tan distinta en origen a la terrestre, pero con algunas características similares tal y como observó EPD) o en las propiedades físicas de la cola de un cometa como fue el cruce de la cola del cometa Atlas en junio de 2021. De más de medio centenar de artículos publicados en este número, 16 usaron datos de EPD, es decir, puede afirmarse que casi uno de cada 3 artículos publicados utilizó los datos de nuestro instrumento. Además cabe destacar que el artículo de [Mason et al. \(2021\)](#), sobre sucesos ricos en He-3, fue el primer artículo con resultados científicos que fue aceptado para publicación de toda la misión SOLAR ORBITER.

No obstante, la posibilidad de correlacionar las medidas remotas con las *in situ* y, además, discernir los efectos espaciales (distinta conexión magnética con la fuente en el Sol) y temporales (variaciones temporales de la propia fuente de partículas energéticas) solo es posible cuando la nave se encuentra a distancias del orden de 0,3 au, cosa que ocurrió en marzo de 2022 durante el primer perihelio por debajo de 0,4 au. En el momento de escribir este artículo, estamos preparando las publicaciones para el

Tabla 1. Artículos del número especial de A&A que hicieron uso de EPS.

Tema	Título	Autores	doi
Sol/Partículas Energéticas	3He-rich solar energetic particle events observed on the first perihelion pass of Solar Orbiter	G. M. Mason et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039752
	Suprathermal particles from corotating interaction regions during the first perihelion pass of Solar Orbiter	R. C. Allen et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039870
	First near-relativistic solar electron events observed by EPD onboard Solar Orbiter	R. Gómez-Herrero et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039883
	Quiet-time low energy ion spectra observed on Solar Orbiter during solar minimum	G. M. Mason et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140540
	The long period of 3He-rich solar energetic particles measured by Solar Orbiter 2020 November 17–23	R. Bučík et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141009
	Solar energetic particle heavy ion properties in the widespread event of 2020 November 29	G. M. Mason et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141310
	The first widespread solar energetic particle event observed by Solar Orbiter on 2020 November 29	A. Kollhoff et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140937
First year of energetic particle measurements in the inner heliosphere with Solar Orbiter's Energetic Particle Detector	R. F. Wimmer-Schweingruber et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140940	
Sol/Emissiones Solares de Masa	Solar origins of a strong stealth CME detected by Solar Orbiter	J. O'Kane et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140622
	Study of two interacting interplanetary coronal mass ejections encountered by Solar Orbiter during its first perihelion passage	D. Telloni et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140648
	Multi-spacecraft observations of the structure of the sheath of an interplanetary coronal mass ejection and related energetic ion enhancement	E. K. J. Kilpua et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140838
	Radial evolution of the April 2020 stealth coronal mass ejection between 0.8 and 1 au	Johan L. Freiherr von Forstner et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039848
Medio Interplanetario /Partículas Energéticas	Evidence for local particle acceleration in the first recurrent galactic cosmic ray depression observed by Solar Orbiter	A. Aran et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140966
	Cosmic-ray flux predictions and observations for and with Metis on board Solar Orbiter	C. Grimani et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140930
Venus	Energetic ions in the Venusian system: Insights from the first Solar Orbiter flyby	R. C. Allen et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140803
Cometa Atlas	Solar Orbiter's encounter with the tail of comet C/2019 Y4 (ATLAS): Magnetic field draping and cometary pick-up ion waves	L. Matteini et al.	https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141229

segundo número de *Astronomy & Astrophysics* basado en datos de este perihelio. Podemos entonces afirmar que lo mejor está aún por venir.

Por último, es necesario comentar que además de sus contribuciones científicas, EPD tiene también una relevancia particular respecto de los temas de Meteorología Espacial. Concretamente, el 17 de abril de 2021, dos días antes del primer vuelo del helicóptero *INGENUITY* sobre la superficie de Marte, una eyección coronal de masa (CME) fue expulsada desde el Sol en dirección a Marte. Los modelos desarrollados por NASA predecían la llegada de la CME a Marte (y de la posible radiación de alta energía asociada) el 22 de ese mismo mes, comprometiendo de esta forma el segundo vuelo del *INGENUITY*. Dado que *SOLAR ORBITER*, y en concreto EPD, se encontraba justo en el camino de la CME, nuestro equipo fue contactado por NASA para evaluar el riesgo de radiación de alta energía. Riesgo que resultó ser bajo y por tanto el *INGENUITY* pudo realizar su segundo vuelo sin ningún contratiempo. La Figura 3 muestra el dron *INGENUITY* a la izquierda, la predicción del modelo ENLIL en el panel central con Marte y *SOLAR ORBITER* representados con un círculo y un rombo rojo respectivamente en el momento del impacto de la CME sobre la nave y los datos de iones y electrones medidos por EPD durante ese periodo.

LAS MEDIDAS DEL POLARIMETRIC AND HELIOSEISMIC IMAGER

SO/PHI es un complejo instrumento dedicado a proporcionar imágenes del vector campo magnético, \mathbf{B} , y de la velocidad a lo largo de la línea de visión, v_{LOS} de la fotosfera solar. De hecho, puede calificarse como el primer magnetógrafo y tacógrafo de la historia *stricto sensu*, aunque otros precursores hayan utilizado el calificativo de magnetógrafos. Esto es así porque SO/PHI es el primer instrumento de la historia capaz de producir autónomamente esos mapas de \mathbf{B} y v_{LOS} . Entenderemos enseguida por qué.

Para proporcionar imágenes, PHI incorpora sus propios telescopios: en concreto, dos, uno que forma imagen del disco entero (el *full disk telescope* o FDT) y otro que lo hace de una pequeña zona de la superficie solar (el *high resolution telescope* o HRT). Ambos telescopios se alternan para dirigir la luz a un camino óptico único y común para ambos. Para preservar la resolución espacial del HRT y no depender de la insuficiente puntería proporcionada por la nave, el instrumento cuenta con un seguidor

por correlación que actúa sobre un espejo ágil en tiempo real a fin de corregir los efectos de las vibraciones residuales.

Para inferir v_{LOS} , obviamente, SO/PHI debe hacer espectroscopía para utilizar el efecto Doppler. La hace mediante un interferómetro Fabry-Pérot cuyo perfil de transmisión tiene una anchura a media altura de $10,6 \pm 0,5$ pm. Así pues, con imágenes casi monocromáticas, se barre secuencialmente la línea en hasta cinco longitudes de onda con un paso de 7 pm más otra en el continuo adyacente a 30 pm del centro de la línea de Fe I a 617,3 nm.

En realidad, para medir la velocidad bastaría con un par de muestras en longitud de onda. La toma de 6 muestras obedece a que, para inferir B debemos acudir al efecto Zeeman en las líneas espectrales. El campo magnético no sólo desdobra las líneas en componentes separadas en longitud de onda, sino que también modifica el estado de polarización de dichas componentes. Debemos medir el perfil de los cuatro parámetros de Stokes de la línea espectral. Por tanto, SO/PHI también debe ser un polarímetro preciso. De hecho, la sensibilidad necesaria para inferir los débiles campos magnéticos que pueblan las regiones menos activas del Sol es de 10^{-3} . Específicamente, el ruido en los perfiles de los parámetros de Stokes Q , U , y V ha de ser $10^{-3} I_c$, donde I_c es la intensidad en el continuo. SO/PHI realiza el análisis polarimétrico mediante el uso de sendos paquetes de polarización (PMP), uno por telescopio y anteriores al interferómetro Fabry-Pérot.

El instrumento toma conjuntos básicos de 24 imágenes de 2048×2048 px², correspondientes a 6 longitudes de onda y 4 estados de polarización, en un tiempo de 1 minuto. Hasta aquí se puede comprender que PHI hace a la vez todo lo que cualquier instrumento astronómico puede realizar: toma imágenes (limitadas por difracción), es un espectrómetro de alta resolución y un polarímetro de gran sensibilidad. Pero, por si esto fuera poco, todos esos datos brutos no se pueden enviar regularmente a la Tierra porque *SOLAR ORBITER* es una misión de espacio profundo: la nave se encuentra demasiado lejos durante la mayor parte de la órbita. De hecho, hay veces que nuestro planeta y el Sol están en conjunción vistos de la nave: los instrumentos a bordo ven la cara que no vemos desde casa. No hay capacidades telemétricas suficientes y SO/PHI, entonces, envía sólo 5 imágenes en lugar de las 24 originales: una de I_c que sirve de contexto, una por cada una de

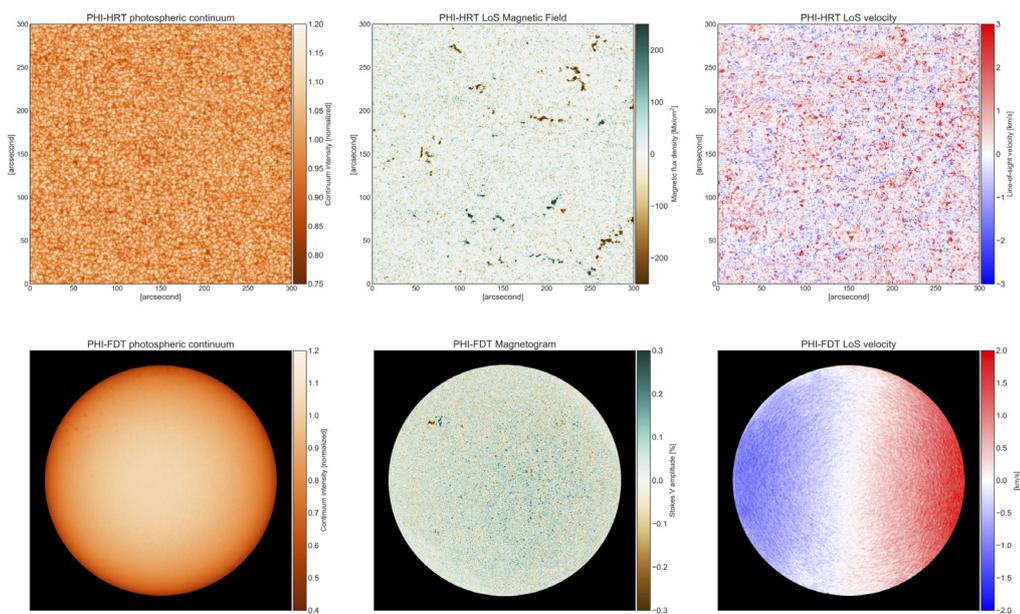


Figura 4. Imágenes de continuo (columna izquierda) y primeros magnetogramas (columna central) y tacogramas (columna derecha) obtenidos autónomamente a bordo de la nave cuando la distancia al Sol era de 0,5 au. Fila superior: imágenes provenientes del HRT; fila inferior: imágenes provenientes del FDT. Cortesía del equipo de SO/PHI.

las componentes del vector \mathbf{B} y otra de v_{LOS} . Para ello, debe obtener en vuelo estos parámetros físicos de la atmósfera solar mediante la inversión de la ecuación (vectorial) de transporte radiativo para luz polarizada.

LA CONTRIBUCIÓN ESPAÑOLA A PHI

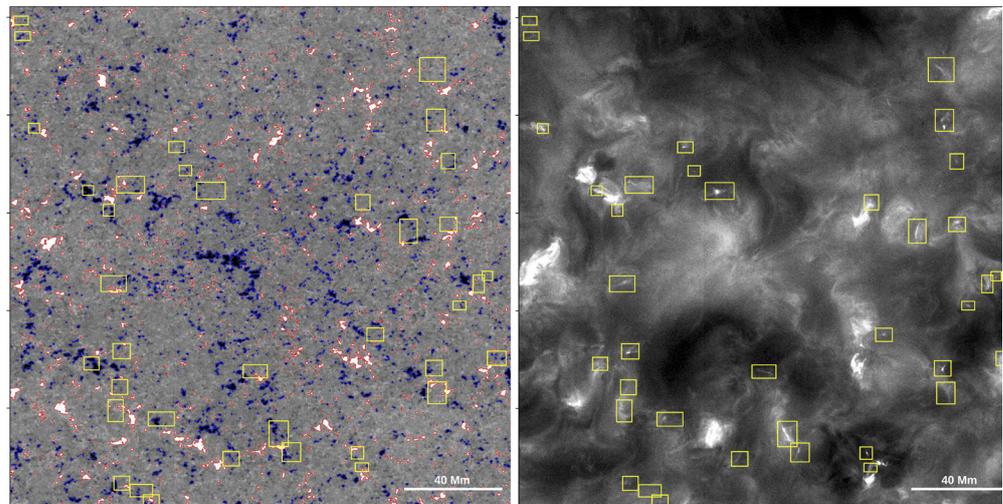
Los interferómetros Fabry-Pérot más usados en astronomía constan de cavidades de aire entre vidrios plano-paralelos que han de moverse y son muy pesados. Tanto, que no podrían volar en esta misión con requisitos tan extremos de masa y potencia. Lo mismo ocurre con los polarímetros clásicos: se basan en el uso de láminas rotantes que, consiguientemente, necesitan motores que introducen ruido y efectos nocivos como el cabeceo del eje óptico de la imagen. Por último, nadie ha invertido la ecuación de transporte radiativo de forma autónoma y, menos, a bordo de una nave espacial.

El equipo de INTA se ha encargado de la cualificación para su uso espacial de los etalones sólidos de LiNbO_3 . Estos dispositivos electroópticos sustituyen con alto voltaje el movimiento de las placas de los tradicionales para realizar la sintonización de las distintas muestras de longitud de onda. Están volando por primera vez en el espacio. Pero es que el mismo equipo del INTA ha desarrollado unos PMP basados en retardadores ópticos de cristal líquido que sustituyen a las láminas rotantes, de nuevo, con dispositivos electroópticos. Vuelan en SO/PHI también por primera vez. Por último, el equipo del IAA-CSIC ha desarrollado un inversor electrónico de la ecuación de transporte radiativo: una matriz de puertas lógicas programable en campo (un *chip*) especialmente diseñado para realizar de forma intensiva en media hora a bordo de la nave, y consumiendo tan sólo

~ 5 W, lo que hacen 50 CPU en Tierra, consumiendo cientos de W. Este dispositivo es el primero de su especie. No existen equivalentes ni para su uso terreno.

Hasta aquí las innovaciones tecnológicas españolas que, como se comprende fácilmente, son clave para el cumplimiento de los objetivos de PHI. Pero las aportaciones han ido más allá. De hecho, el propio concepto de instrumento hereda mucho de IMaX (*Imaging Magnetograph eXperiment*; Martínez Pillet, Del Toro Iniesta, Álvarez-Herrero et al. 2011), instrumento desarrollado por el mismo consorcio, el hoy denominado Spanish Space Solar Physics Consortium (S³PC). IMaX fue desarrollado para la misión estratosférica SUNRISE y sirvió de banco de pruebas y demostración para el uso espacial de las dos primeras tecnologías. La tercera simplemente hereda el conocimiento destacado de la escuela española de espectropolarimetría. El INTA desarrolló el telescopio FDT además de los PMP. La UB desarrolló la electrónica del sistema estabilizador de imagen. El IDR-UPM estuvo a cargo de todo el diseño y el *hardware* térmico del instrumento, así como del análisis de estructuras de la unidad electrónica (E-Unit). Además de primer coordinador del equipo español, el IAC fue responsable del sistema de compresión de datos (que se ejecuta en el mismo chip que el inversor). La UV desarrolló el módulo redundante convertidor de potencia, la mecánica de la E-Unit y un potente simulador del instrumento en su conjunto (SOPHISM; Blanco Rodríguez, Del Toro Iniesta, Orozco Suárez et al. 2018), que, de hecho, es virtualmente generalizable con facilidad a cualquier otro instrumento, no únicamente solar. Por último, el IAA-CSIC, además del inversor, fue responsable del conjunto de la E-Unit y el cableado del

Figura 5. Distribución de las “fogatas” superpuesta a los magnetogramas de SO/PHI (izquierda) e identificadas en la imagen en el ultravioleta extremo proporcionada por EUI (derecha). Los contornos rojos (positivos) y azules (negativos) contienen campos longitudinales $|B_{LOS}| \geq 21$ G (3 veces el ruido). Las cajas amarillas encierran las zonas donde se encuentran los abrigamientos calificados como fogatas. El magnetograma está saturado a ± 40 G. La escala de tamaños está indicada en la parte inferior derecha de las imágenes. Tomada de Kahil, Hirzberger, Solanki et al. 2022, A&A 660, A143.



instrumento. Dentro de la E-Unit, desarrolló la tarjeta de control analógico de mecanismos y calentadores, así como el sistema de distribución eléctrica.

Como es fácil de imaginar, la participación industrial también ha sido intensa. La empresa SENER Aeroespacial ha fabricado los modelos de cualificación, de vuelo y de repuesto de la E-Unit, ALTER Technology (española con capital europeo) se ha encargado del aprovisionamiento de componentes cualificados para el vuelo de los 10 instrumentos científicos, CASA División Espacio (ADS) ha fabricado el *hardware* térmico de SO/PHI, Axon (francesa con delegación en España) ha fabricado los cables de vuelo y de repuesto, Arcoptix (suiza) ha fabricado los retardadores ópticos de cristal líquido para los PMP, Activa-Norinstal ha contribuido al diseño óptico y C.A. Asociados ha fabricado la mecánica y optomecánica de la contribución española al banco óptico de vuelo.

La labor del IAA-CSIC como institución coinvestigadora principal, además de la construcción del instrumento en sí ha estado en la corresponsabilidad del diseño científico y de las operaciones del instrumento, así como en la participación en numerosos comités de la misión.

PRIMEROS RESULTADOS DE SO/PHI

A diferencia de los instrumentos de medida local, como EPD, los de sondeo remoto comenzaron su fase científica en noviembre de 2021. Durante la fase previa de cruce, tuvieron determinadas *ventanas* en las que poder cotejar el funcionamiento de los instrumentos y comprobar su estado en los distintos escenarios cambiantes

a lo largo de la órbita. Durante la fase científica, estos instrumentos, y SO/PHI con ellos, sólo observan de forma intensiva en tres ventanas de diez días por órbita, coincidentes con el perihelio y la máxima y mínima heliolatitudes. El resto del tiempo, instrumentos como SO/PHI vigilan el estado del Sol con una cadencia tan sólo de entre 6 horas y varios días. Además de la escasez de tiempo y la complejidad del instrumento que aún necesita algunas puestas a punto, PHI ha proporcionado datos inéditos y muy interesantes resultados. Por ejemplo, hemos obtenido los primeros magnetogramas y taquogramas autónomos de la historia (véase la Figura 4). También hemos observado el campo magnético de la cara del Sol que no vemos desde Tierra lo cual tiene una gran trascendencia para progresar en nuestro conocimiento del tiempo espacial. De hecho, con las observaciones heliosismológicas terrenas o en órbita terrestre, somos capaces de predecir la actividad en esa cara trasera de nuestra estrella. Hasta ahora, sin embargo, no habíamos sido capaces de corroborar dichas predicciones, que resultan fundamentales para prevenir los eventuales fenómenos solares con influencia directa en la atmósfera de nuestro planeta (Strecker, Jain, Orozco Suárez et al. 2023, en preparación). Las observaciones del campo magnético de la cara trasera también nos permiten realizar estudios evolutivos de regiones activas a largo plazo (Strecker, Moreno Vacas, Orozco Suárez et al. 2023, en preparación) combinándolas con observaciones desde Tierra. También hemos podido estudiar el origen magnético (Kahil, Hirzberger, Solanki et al. 2022, A&A 660, A143) de las llamadas “fogatas” solares, fulguraciones a muy pequeña escala (véase la Figura 5), descubiertas por el Extreme Ultraviolet Imager (EUI), otro de los instrumentos a bordo de SOLAR ORBITER.

El tercer catálogo de datos de la misión *Gaia* (*Gaia*-DR3, *Gaia* Collaboration, Vallenari et al 2022), incluye por primera vez la espectrofotometría de más de 219 millones de objetos (De Angeli et al 2022), cubriendo los dos hemisferios celestes (Fig. 1) con un único instrumento y con la precisión asociada a datos obtenidos desde el espacio. *Gaia* tiene dos instrumentos espectrofotométricos, uno que observa en el rango azul del espectro visible (Blue Photometer o BP que cubre el rango 330-680 nm de longitudes de onda) y otro en el rango rojo (Red Photometer o RP, 640-1000 nm). La resolución espectral es dependiente de la longitud de onda y siempre inferior a 100 (ver Carrasco et al 2021). La información espectrofotométrica permite modelar los efectos de cromaticidad en el plano focal, proporcionando la precisión necesaria para convertir *Gaia* en una misión capaz de revolucionar múltiples campos de la astrofísica.

Josep Manel Carrasco¹
Michael Weiler¹
Minia Manteiga²
Carme Jordi¹
Claus Fabricius¹
Daniel Garabato²
Lara Pallas-Quintela²
Marco A. Álvarez²
Carlos Dafonte²
Luis Manuel Sarro³

¹ Institut de Ciències del Cosmos,
Universidad de Barcelona, IEEC-UB

² CIGUS CITIC, Universidade da Coruña

³ Dept. de Inteligencia Artificial, Universidad
Nacional de Educación a Distancia (UNED)

Los grupos de la Universitat de Barcelona, la Universidade da Coruña y la Universidad Nacional de Educación a Distancia han participado en todas las etapas del análisis de estos datos espectrofotométricos. Estas etapas incluyen el diseño del instrumento, la monitorización de su salud durante la misión, la calibración y verificación de los datos obtenidos, su análisis para determinar los parámetros astrofísicos de las fuentes observadas y la validación del catálogo para su publicación.

LOS ESPECTROS EN DR3

Gaia-DR3 incluye los espectros BP/RP para los objetos con magnitud $G < 17.65$ mag y más de 15 observaciones en el instrumento espectrofotométrico. Además, se han incluido explícitamente los espectros de algunos objetos intrínsecamente más débiles (enanas blancas, cuásares, galaxias, estrellas ultrafrías, estrellas de calibración...).

El catálogo de *Gaia* proporciona el espectro externo, totalmente calibrado en flujo absoluto y longitud de onda, y también el espectro interno, descrito en flujos instrumentales y pseudo-longitudes de onda. El enlace https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20220610 permite ver cómo cambian estos dos tipos de espectro según su posición en el diagrama Hertzsprung-Russell. La Fig. 2 muestra la relación señal a ruido de los espectros internos publicados para algunas estrellas de magnitud $G = 16$ mag. Como se puede apreciar, la forma de los espectros cambia con el color de las estrellas, dejando ver también el efecto de algunas líneas espectrales.

NUEVOS DATOS REQUIEREN NUEVAS TÉCNICAS

Los espectros BP y RP de *Gaia* no se expresan como un conjunto discreto de valores de flujo y longitud de onda. En su lugar, se expresan mediante 55 coeficientes en cada instrumento (BP o RP), que representan los pesos de cada una de las funciones base en su combinación lineal. Esta inusual representación de un espectro es consecuencia de su proceso de calibración (Carrasco et al. 2021). A partir de estos coeficientes, el flujo en función de la longitud de onda puede calcularse fácilmente. La herramienta *GaiaXPy* (<https://gaia-dpci.github.io/GaiaXPy-website/>) facilita esta conversión para el usuario.

Si bien los coeficientes de un espectro generalmente sólo están débilmente correlacionados, al transformarlos a valores de flujo en función de la longitud de onda, éstos sí que tienden a estar fuertemente correlacionados.

Por lo tanto, es ventajoso comenzar el análisis de los espectros de BP/RP utilizando los coeficientes y evitar el muestreo de los espectros siempre que sea posible.

Esta es una forma nueva de trabajar con datos espectroscópicos, pero también es una forma que permite cálculos rápidos y eficientes, incluso para análisis complejos. El análisis de líneas espectrales presentado en Weiler et al (2022) proporciona un buen ejemplo de ello. A modo de ilustración, la Fig. 3 muestra cómo los coeficientes espectrales representan las diferentes líneas de Balmer de hidrógeno para una estrella de $G=14.2$ mag y una temperatura efectiva de 9900 K. Si bien estamos acostumbrados a la separación del continuo y las líneas en los espectros muestreados, toda la información está contenida en los coeficientes y los cálculos se realizan de manera más eficiente con ellos.

PARÁMETROS FÍSICOS Y ANÁLISIS DE “OUTLIERS”

A pesar de su modesta resolución espectral, la espectrofotometría de *Gaia* permite también determinar

los parámetros astrofísicos de los objetos. Así, el equipo de *Gaia*, utilizando una serie de algoritmos, han proporcionado la clasificación y parametrización de los diferentes objetos astronómicos (Creevey et al. 2022). En *Gaia* DR3 se proporciona la clasificación de prácticamente todos los objetos del catálogo (1590 millones), sus parámetros atmosféricos (T_{ef} , $\log g$, $[M/H]$, A_G , etc.) de más de 470 millones de estrellas y el desplazamiento al rojo de unos 6,3 millones de objetos candidatos a cuásares y de 1,3 millones de objetos candidatos a galaxias.

Los algoritmos que se usaron son de dos tipos, o bien basados en las propias observaciones de *Gaia* o bien basados en modelos de atmósferas e isócronas. Entre los algoritmos del primer tipo están los que se encargan de clasificar las fuentes en estrellas u objetos extragalácticos, proporcionar estimaciones de temperatura de enanas ultrafrías y los que utilizan mapas auto-organizativos (SOM, Delchambre et al 2022) para proponer una clasificación de los objetos con baja

Figura 1. Densidad de objetos en el cielo con datos BP/RP disponibles en la tercera publicación de datos de *Gaia*, *Gaia*-DR3. Figura extraída de De Angeli et al 2022.

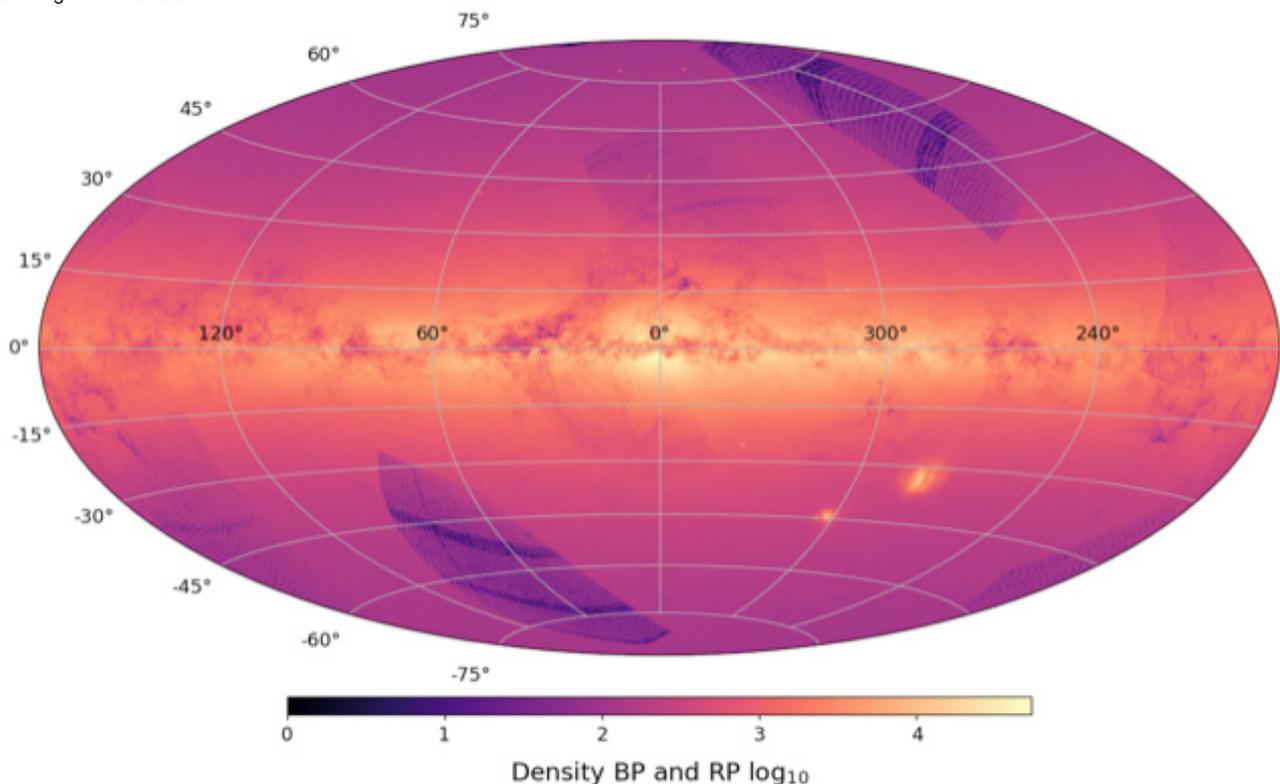


Figura 2. Relación señal a ruido de los espectros internos BP (izquierda) y RP (derecha) para distintas estrellas de magnitud $G \sim 16$ mag con distintos valores del color $G_{BP} - G_{RP}$. Figura extraída de De Angeli et al 2022.

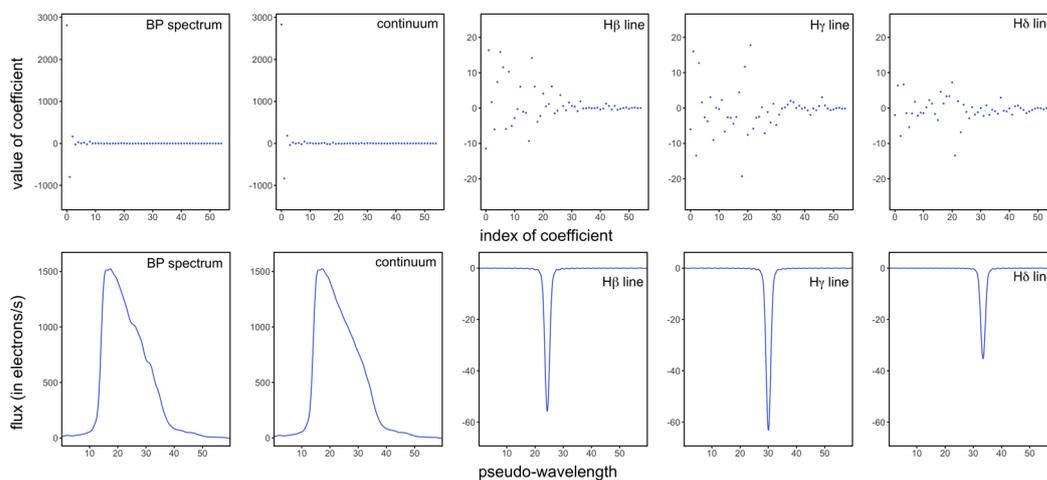
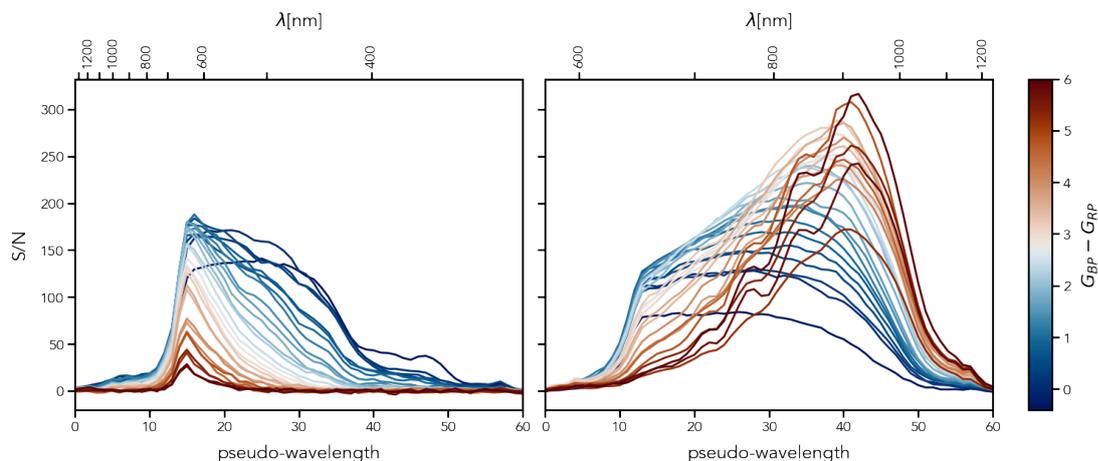


Figura 3. Espectros BP de *Gaia* DR3 505171240162594560, mostrando las líneas $H\beta$, $H\gamma$ y $H\delta$. Los paneles de arriba muestran los coeficientes que representan las características de los espectros calibrados internamente en los paneles de abajo una vez muestreados en flujo.

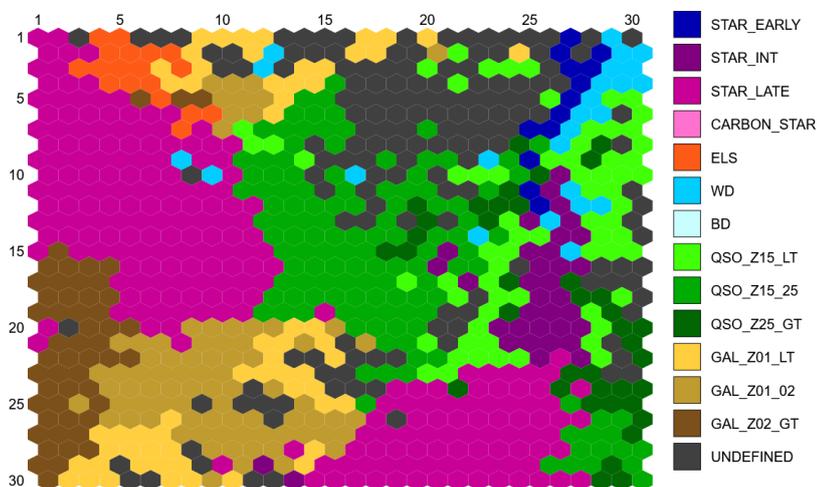


Figura 4. Mapa auto-organizativo (obtenido con GUASOM, Álvarez et al. 2021) de las fuentes con baja probabilidad de pertenencia a clases astronómicas básicas, es decir, *outliers* de clasificación en *Gaia* DR3. Los colores representan su similitud con espectros de distintos tipos de objetos.

probabilidad de pertenencia a las clases astronómicas conocidas. En la Fig. 4 se muestra el mapa SOM etiquetado con clases astronómicas obtenido en DR3.

Los algoritmos que extraen parámetros astrofísicos a partir de los espectros BP o RP lo hacen a dos niveles: un paquete genérico denominado GSP-Phot calcula parámetros bajo la hipótesis de que todas las observaciones corresponden a estrellas y utiliza métodos de Monte Carlo basado en cadenas de Markov (MCMC), mientras que algoritmos específicos se centran en obtener parámetros más precisos para tipos de objetos concretos, como QSOC (dedicado a parametrizar cuásares), UGC (galaxias no resueltas) o los módulos ESP dedicados a espectros de estrellas calientes ($T_{\text{ef}} > 7500$ K; ESP-HS), ultrafías (tipos espectrales más tardíos de M7; ESP-UCD) o estrellas con líneas de emisión (ESP-ELS).

CONCLUSIONES

Como hemos visto, los primeros datos espectrofotométricos publicados por la misión *Gaia* demuestran su gran potencial para extraer las propiedades astrofísicas de los objetos observados. Además, su disponibilidad en cualquier región del cielo permite utilizarlos como fuente de objetos estándares para otros programas observacionales. En futuras publicaciones de datos, la espectrofotometría de *Gaia* estará disponible para todos los objetos del catálogo (del orden de 2000 millones de fuentes). Además, también se publicarán, no sólo los espectros prome-

dios, sino también cada uno de los espectros observados en cada tránsito realizado durante la misión. Esto permitirá estudiar los efectos de variabilidad en distintas regiones espectrales.

Es impresionante ver como cada una de las promesas hechas hace años por la misión *Gaia* se van cumpliendo en cada nueva publicación de datos, constituyendo el catálogo que será (y ya está siendo) la base de la astrofísica en las próximas décadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, M.A. et al 2021, *Neural Computing and Applications* 34, 1993-2006 (2021).
- Carrasco et al. 2021, "Internal calibration of *Gaia* BP/RP low-resolution spectra", *A&A* 652, A86, 20.
- Delchambre et al. 2022, "Gaia Data Release 3. Apsis. III. Non-stellar content and source classification", *A&A* (in press), arXiv:2206.06710
- Gaia Collaboration, Creevey, O.L. et al 2022, "Gaia Data Release 3: Astrophysical parameters inference system (Apsis) I: methods and content overview", *A&A* (in press), arXiv:2206.05864
- De Angeli et al. 2022. "Gaia Data Release 3: Processing and validation of BP/RP low-resolution spectral data", *A&A* (in press), arXiv:2206.06143
- Gaia Collaboration, Vallenari, A. et al 2022, "Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties", *A&A* (in press), arXiv:2208.00211
- Weiler et al. 2022, *A&A* (in press), arXiv:2211.06946



Los autores de este artículo.

GAIA-DR3: EL PRIMER CATALOGO

El 13 de junio de 2022 se publicó la tercera entrega pública de datos de Gaia, incluyendo no sólo los datos de parámetros astrométricos y físicos, sino también catálogos de diferentes objetos variables. En particular el primer catálogo de Núcleos Galácticos Activos (AGN). Un catálogo con alrededor de un millón de AGN variables de diferentes tipos, cuya selección se ha basado en la utilización de datos multibanda de Gaia, y cuyas series temporales y algunos parámetros que caracterizan la variabilidad han sido obtenidos. Destacamos que alrededor de 21000 objetos son nuevas identificaciones como objetos variables.



Maria Isabel Carnerero Martin
INAF-Osservatorio Astrofisico di Torino
maria.carnerero@inaf.it

Ruth Carballo
Universidad de Cantabria
carballor@unican.es

Los Núcleos Activos de Galaxias (AGN por sus siglas en inglés) se caracterizan por liberar gran cantidad de energía proveniente de la parte central de la galaxia. El mecanismo de generación de la misma es debido al acrecimiento de material en un disco que se forma alrededor de un agujero negro supermasivo (SMBH), cuya masa es superior a un millón de masas solares. Los AGN pueden ser de diferentes tipos según el criterio que se use para su clasificación y engloban las galaxias tipo Seyfert y los cuásares, más luminosos. Así pues existe una fracción de ellos que son fuertes emisores de ondas de radio y que muestran la emisión de dos chorros de plasma a velocidades relativistas, y en una dirección que se supone perpendicular al disco de acrecimiento. Cuando esta dirección está próxima a la línea de visión aparecen efectos tales como amplificación Doppler y acortamiento de la escala temporal. Estas características definen una clase de objetos llamados blazars, que se clasifican en dos tipos: los BL Lacs, caracterizados por no presentar rasgos espectrales en su emisión en el rango visible y los radio cuásares de espectro plano (FSRQs), que suelen mostrar intensas líneas de emisión en ese rango.

El flujo de la mayoría de los AGN presenta variabilidad a algún nivel, con diferentes escalas de tiempo y amplitudes. En general, la emisión del continuo óptico del AGN, dominada por la radiación térmica proveniente del disco de acreción, muestra una variabilidad suave en escalas de tiempo de meses a años. Por el contrario, la fuente predominante de emisión en el rango visible en los blazars más activos es la radiación no térmica (sincrotrón) del chorro relativista, donde por efecto Doppler aumenta la amplitud de la variabilidad y se reduce su escala temporal, observándose incluso cambios de flujo en escalas de pocas horas. En objetos cercanos, con bajo desplazamiento al rojo, la emisión de la galaxia anfitriona puede contribuir de manera importante, o incluso dominar, la emisión visible, reduciendo la amplitud de la variabilidad.

SELECCIÓN DE LOS OBJETOS DE NUESTRO CATÁLOGO

Nuestro objetivo era seleccionar una muestra de candidatos AGN variables lo más pura posible. La línea de procesado para la clasificación de objetos variables nos proporcionó una muestra inicial de

más de 100 millones de fuentes, y el primer requisito que impusimos para su consideración fue la presencia de al menos 20 puntos en la curva de luz de la banda G. Seguidamente determinamos para cada fuente cinco parámetros relacionados con la amplitud y la escala temporal de las variaciones, nuevos, de la literatura, o adaptados de la literatura. Estos parámetros son la fracción de variabilidad, los parámetros de variabilidad 'qso_var' y 'non_qso_var' de Butler & Bloom (Butler, N. R. & Bloom, J. S. 2011, AJ, 141, 93) que permiten distinguir los cuásares de las estrellas, la pendiente de la función de estructura, que informa de la escala de tiempo de la variabilidad, y finalmente el 'ranking de pertenencia', que ordena las fuentes respecto de su probabilidad de tratarse de un AGN. Pudimos determinar estos parámetros para 34 millones de fuentes, siendo éstas las que pasaron a la siguiente fase. Los valores se encuentran publicados en la tabla Gaia-DR3 vari_agn.

El procedimiento de selección continuó con la aplicación de una secuencia de filtros basados en datos de Gaia, tomando como referencia los objetos del Gaia Celestial Reference Frame 3 (Gaia-CRF3, Klioner, S. A. 2022, A&A, in press). La meta en este paso fue que al tiempo que la muestra de AGN variable fuera lo más pura posible, la pérdida de objetos incluidos en Gaia-CRF3 fuera mínima. Adoptamos además una serie de filtros para reducir la posible contaminación por estrellas o galaxias. Concretamente filtramos respecto de la pendiente de la función de estructura, de los parámetros de Butler & Bloom, del diagrama 'abbe' frente 'ruwe' (parametro de variabilidad en curvas de luz 'abbe' frente a parametro de calidad astrométrica 'ruwe', ver Documentacion, <https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR3/index.html>), de los índices de color en el diagrama G-G_{RP} frente a G_{BP}-G y de los movimientos propios y paralaje. Para reducir la clasificación errónea como AGN en campos con una alta densidad de fuentes, como el Plano Galáctico y las Nubes de Magallanes, establecimos una restricción respecto a la máxima densidad de fuentes en el entorno de cada candidato. También eliminamos los objetos con indicios de que su variabilidad fuera artificialmente inducida, debido al efecto del rastreo a distintos ángulos de fuentes extensas. Tanto en las galaxias normales como en las galaxias anfitrionas de los AGN Gaia puede

inducir este efecto. Finalmente realizamos una última selección, para asegurar un grado más la reducción de posible contaminación, usando el parámetro de probabilidad de variabilidad de Gaia.

Después de todo este proceso llegamos a nuestra lista final de 872228 objetos candidatos a AGN variables (denominada GLEAN, Gaia variable AgN). 150017 de ellos no están incluidos en Gaia-CRF3 (CANOE, CANDIDATES TO EXPLORE). La muestra incluye además casi 3000 objetos variables que debido a sus propiedades peculiares (blazares, AGN con lentes y los AGN más brillantes conocidos, todos confirmados de la literatura) no pasaron algún paso de la selección, pero que se agregaron a la muestra final por su interés.

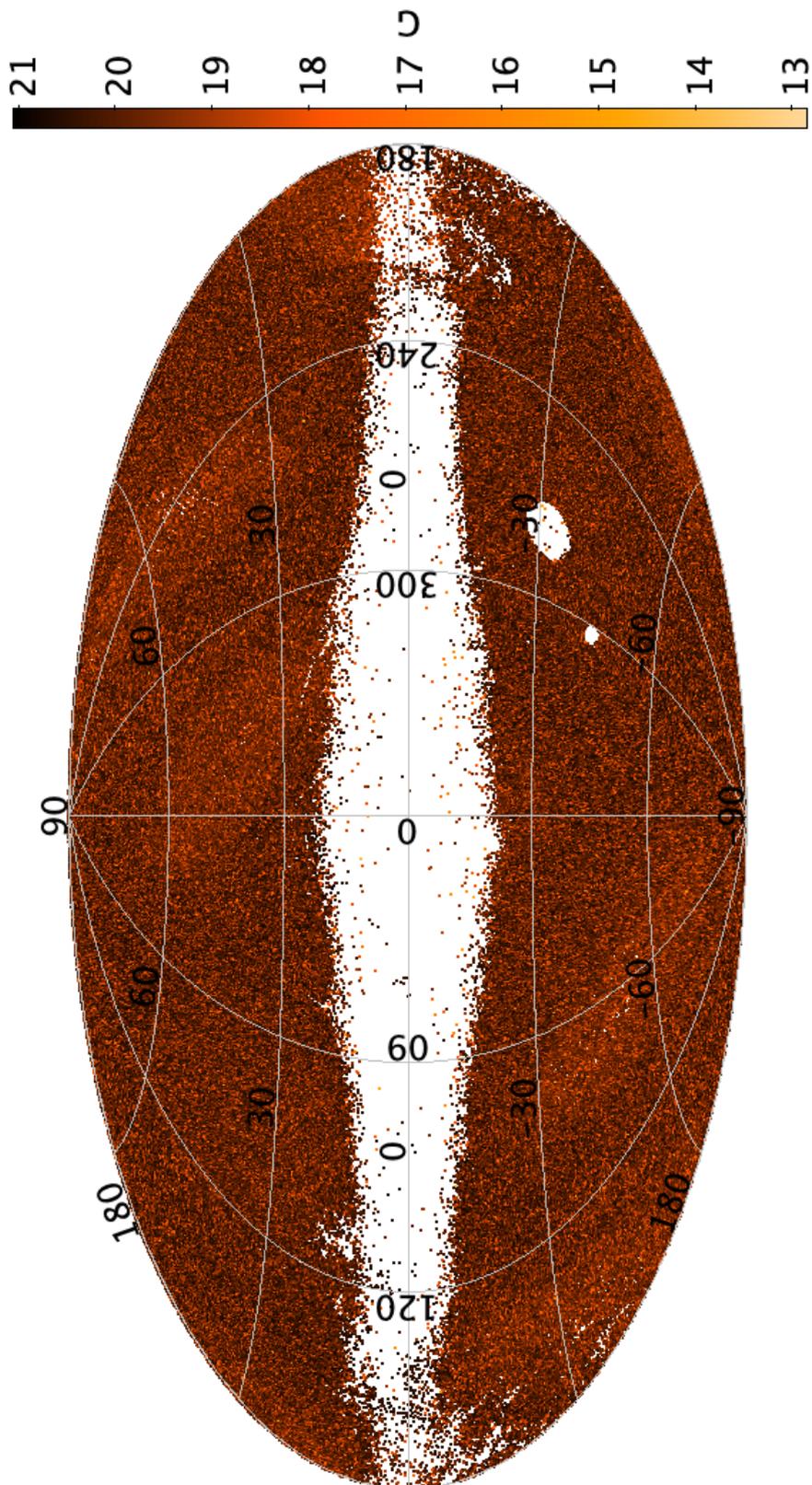
LA MUESTRA DE AGN VARIABLES DE GAIA (GLEAN)

La distribución en el cielo de las fuentes de la muestra GLEAN se muestra en la Fig. 1. El Plano Galáctico y las Nubes de Magallanes están casi vacías, como era de esperar debido a los filtros aplicados, en particular el del entorno. Sin embargo, todavía hay un exceso de AGN alrededor de las Nubes de Magallanes, lo que puede indicar alguna contaminación estelar o a las limitaciones de los estudios extragalácticos en estas regiones de alta densidad.

Una de las principales novedades de Gaia DR3 es la publicación de las curvas de luz para los AGN seleccionados en este trabajo. La Fig. 2 muestra en el panel superior un ejemplo de una curva de luz multibanda de Gaia. En el panel inferior mostramos el espectro de resolución intermedia de la fuente obtenido en el Sloan Digital Sky Survey (SDSS), junto con el de baja resolución de Gaia. Asimismo se muestran las bandas fotométricas de Gaia, para resaltar su cobertura espectral. Las respuestas espectrales de las tres bandas y el espectro están disponibles en DR3. Esta fuente es del tipo FSRQ y su desplazamiento al rojo es $z=0.414$. Podemos observar en su curva de luz como hay al comienzo un flare rápido con una disminución del brillo de aproximadamente 2 magnitudes, seguida de un aumento lento del brillo. En el espectro SDSS se detectan las líneas de emisión más prominentes de los cuásares a este redshift, MgII, H γ , H β y [OIII].

Esto indica una fuerte contribución a la emisión de la región de las líneas anchas, además de la del chorro y del disco de acrecimiento del AGN.

Figura 1. Distribución de los objetos del catálogo GLEAN en el cielo.



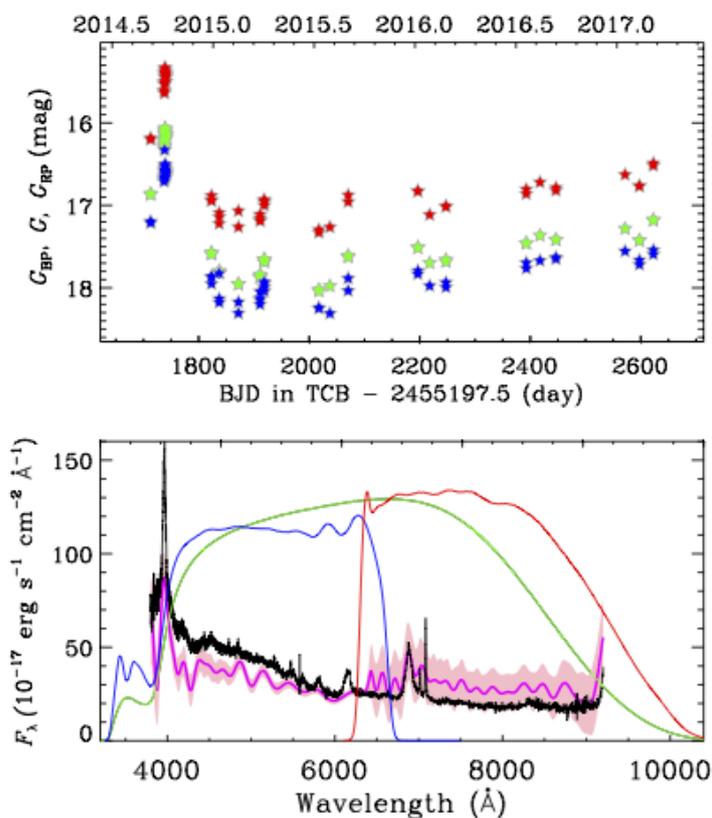


Figura 2. FSRQ 5BZQJ1549+0237 (Gaia DR3 44234482190030 43968). Panel superior: curvas de luz G (verde), G_{RP} (rojo), G_{BP} (azul). Panel inferior: espectro SDSS (negro), espectro de baja resolución de Gaia (rosa) con su incertidumbre (región rosa sombreada) y bandas de paso de Gaia.

CRUCE DE NUESTRO CATÁLOGO CON OTROS DE LA LITERATURA

La Figura 3 muestra el diagrama color-color W1 – W2 frente a W2 – W3 de las fuentes de nuestro catálogo GLEAN con contrapartida infrarroja en AllWISE (centros de banda a 3.4, 4.6 y 12.1 micras en W1, W2 y W3 respectivamente). Este diagrama es sabido que constituye una poderosa herramienta para la clasificación de fuentes. Los candidatos AGN variables se encuentran en la región donde se espera que estén los cuásares y otros tipos de AGN (por ejemplo, blazars), lo que confirma nuestra selección.

En particular, las fuentes de CANOE están distribuidas en una zona algo más pequeña, lo que sugiere que nuestro procedimiento de selección fue muy estricto, en línea con el requisito de alta pureza. La 'franja blazar', que conecta el lugar geométrico de los cuásares con el de las galaxias de tipo temprano y está mayoritariamente poblada por objetos BL Lac, está claramente trazada por fuentes pertenecientes al catálogo BZCAT5 (aclaramos que las fuentes representadas con esta leyenda son todas fuentes comunes de BZCAT5 y GLEAN).

Se estima que la fracción de AGN potentes en radio ('radio loud') es de alrededor de un 10%, aunque ésta disminuye con el aumento del desplazamiento al rojo y con la disminución de la luminosidad. Comparando la muestra GLEAN con los catálogos de fuentes en radio FIRST, NVSS y VLASS encontramos que 33706 de los candidatos AGN variables son tipo 'radio-loud', representando un 4% de la muestra.

CUÁSARES CON EFECTO LENTE GRAVITATORIA

El catálogo GLEAN incluye más de cien cuásares con efecto lente gravitatoria en los que las distintas imágenes pueden analizarse debido a la buena resolución espacial de Gaia.

Investigamos la posibilidad de derivar mediciones del retardo de tiempo entre las variaciones de flujo observadas correspondientes a las diversas imágenes de un cuásar con lente, que es el primer paso que puede conducir a la determinación del valor de la constante de Hubble. Esta es una tarea difícil, porque los cuásares se caracterizan por una suave variabilidad en escalas de tiempo de meses y porque el efecto microlente de las estrellas

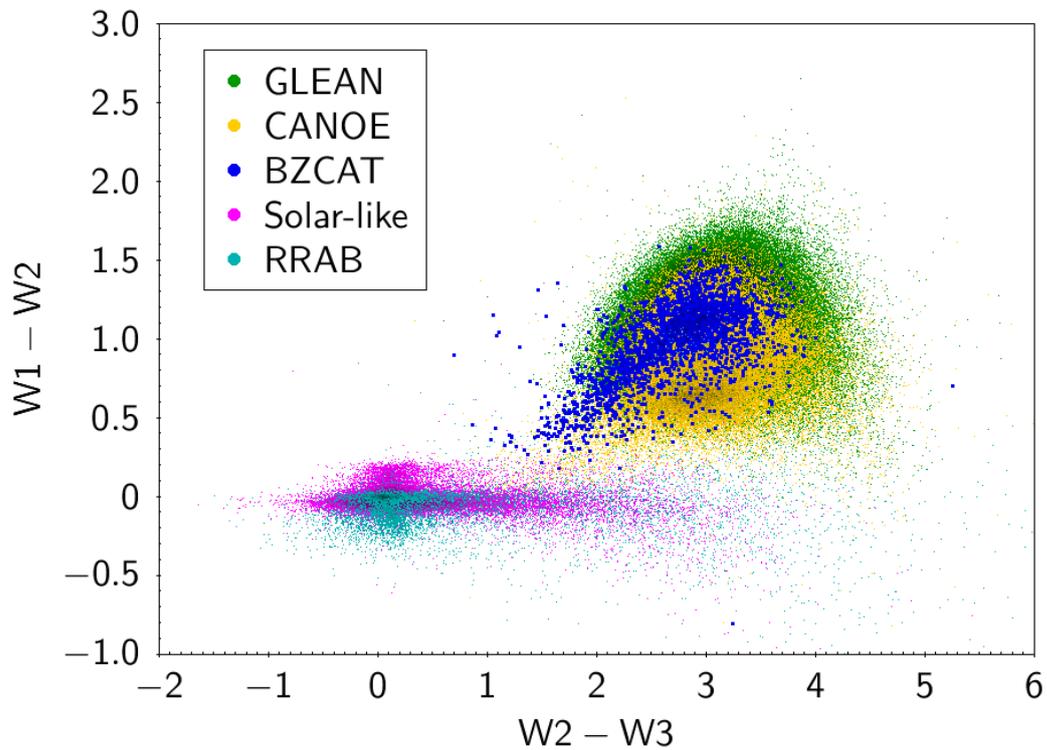
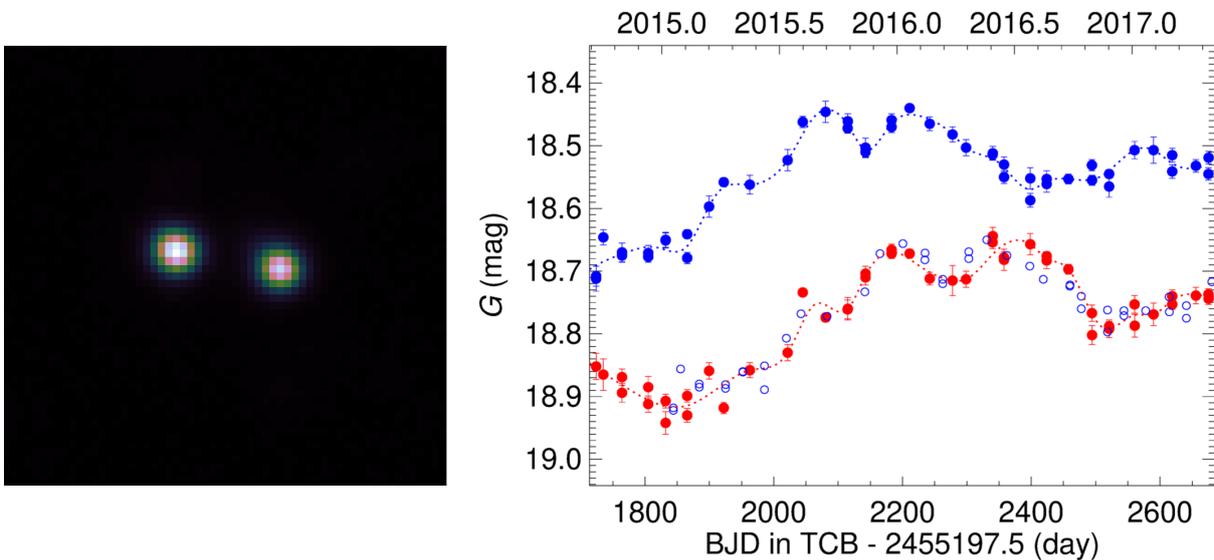


Figura 3. Diagrama color-color WISE de los candidatos AGN variables incluidos en GLEAN, CANOE y BZCAT5. Los blazares marcan la denominada 'región de blazar', que se extiende desde el lugar geométrico de los cuásares hasta la región de las galaxias de tipo temprano. Como ilustración de la localización de estrellas variables mostramos dos tipos, estrellas RR Lyrae y solar-like.

Figura 4. Izquierda: Imagen en la banda g del Dark Energy Survey(DES) del sistema de lentes DESJ0501-4118 (Norte arriba, Este a la izquierda, el tamaño de la imagen es 16.2" x 16.2"). Derecha: Curvas de luz en la banda G de Gaia de la imagen 1 (puntos azules) y la imagen 2 (puntos rojos); los círculos vacíos representan la curva de luz de la imagen 1 desplazada 121 días en tiempo y 0.21 magnitudes en brillo para coincidir con el comportamiento de la imagen 2.



de la galaxia lente puede producir características adicionales, que son diferentes en la curva de luz de las diversas imágenes. Por lo tanto, es necesario un control a largo plazo con un buen muestreo para hacer coincidir las curvas de luz de las distintas imágenes entre sí mediante la aplicación de los cambios correctos en el tiempo y el brillo. Obviamente, la detección de patrones de variabilidad característicos bien definidos mejora sustancialmente la estimación del tiempo de retardo.

Encontramos un ejemplo de este tipo en el cuásar de doble imagen DESJ0501-4118 (Lemon, C. et al, 2020, MNRAS, 494, 3491L), que se muestra en la Figura 4. El comportamiento de variabilidad característico, con una doble joroba en la curva de luz de la imagen más brillante (imagen 1), que puede reconocerse en la curva de luz de la imagen más tenue (imagen 2) después de cierto retraso, hace prometedora la posibilidad de una determinación robusta del retardo de tiempo. Los efectos de microlente de las estrellas dentro de la galaxia lente anteriormente mencionados parecen importantes aquí ya que podrían explicar las diferencias entre las dos curvas de luz que no pueden atribuirse a cambios en el tiempo y la magnitud.

Debido a estos efectos, la simple aplicación de una función de correlación discreta (DCF), un método que se diseñó específicamente para realizar una correlación cruzada de datos muestreados de manera desigual, brinda resultados un tanto inestables, que dependen del intervalo de retraso de tiempo DCF. Un tratamiento detallado de los efectos de microlente es complicado con los datos de Gaia que tenemos hasta el momento. Sin embargo, sí se puede obtener una buena estimación del retraso de tiempo. En este ejemplo concluimos que las variaciones de brillo de la imagen 2 siguen a las de la imagen 1 con un retraso de 119–121 días.

REFERENCIA

- Carnerero, M. I. et al. 2022, "Gaia Data Release 3: The first Gaia catalogue of variable AGN", A&A, in press.

Comencemos con una pregunta a todas luces redundante: ¿de qué están hechas las estrellas de neutrones? La redundancia pierde su condición, solo un instante después, cuando pensamos: ¿cómo se estructura su interior y se comporta la materia a densidades superiores a las del núcleo atómico? Palabras mayores, que ya tienen sus años (Wheeler 1966), de cuando aún no conocíamos ninguna estrella de neutrones. Si hablamos de su densidad, lo hacemos también de su masa y radio, piezas de las esquinas en este puzzle aún por completar. Por fortuna, hemos asistido a una auténtica revolución en la última década gracias a los rápidos avances en los ámbitos técnico, de computación y observación, que nos han ofrecido la oportunidad de *pesar* estrellas de neutrones y medir sus radios con mayor precisión en un gran número de púlsares que forman parte de sistemas binarios.



Pablo Rodríguez Gil
Instituto de Astrofísica de Canarias /
U. de La Laguna
prguez@iac.es

Desde el punto de vista de la evolución de las estrellas, encontrando la ecuación de estado de la materia densa —ultradensa, si queremos— seríamos capaces de trazar una línea entre las estrellas de neutrones y los agujeros negros, ya que diferentes ecuaciones de estado impondrían a las primeras diferentes masas máximas. Las implicaciones en nuestra comprensión de las explosiones de supernovas, el tamaño de las poblaciones de objetos compactos, y el ritmo de producción de eventos de ondas gravitatorias por fusiones en sistemas binarios son claramente relevantes.

LAS VIUDAS NEGRAS Y LOS PÚLSARES

Las hembras de algunas especies de arañas del género *Latrodectus* pueden acabar devorando al macho tras la cópula —que es cosa de dos cuerpos—, lo que les ha hecho ganarse el apelativo de “arañas viudas” o “viudas negras”. El descubrimiento en los años 1980 del púlsar de milisegundos PSR B1957+20 (PSR J1959+2048; Fruchter, Stinebring & Taylor 1988) puso sobre la mesa la existencia de estrellas de neutrones cuya intensa radiación en el rango de las altas energías podía haber “vaporizado” su estrella compañera en un sistema binario, también asunto de dos cuerpos y de evidente semejanza con algunas *Latrodectus* (Fig. 1). Este hallazgo apoyaba las hipótesis previas que apuntaban a la transferencia de materia, y por tanto de momento angular, desde la compañera a la estrella de neutrones como causa de la aceleración de su rotación hasta frecuencias del orden de los 1000 Hz.

Volviendo a la masa y a la ecuación de estado, estos sistemas binarios podrían albergar algunas de las estrellas de neutrones más masivas, sin duda una prueba de fuego para algunas ecuaciones de estado propuestas, que pueden ponerse en cuarentena o ser directamente descartadas (ver, p. ej., Linares, Shahbaz & Casares 2018).

EL SISTEMA ZTF J1406+1222

Hoy en día disfrutamos, y mucho, de la gran ventaja de tener a mano una variedad de mapeos del cielo (*surveys*) con un muestreo fotométrico temporal adecuado para descubrir sistemas binarios con periodos orbitales cortos en virtud de su variabilidad a lo largo de la órbita.

Con el objetivo de encontrar en el visible sistemas con órbitas menores de una hora, que bien podrían ser emisores de ondas gravitatorias por encima del umbral de detección de la *Laser Interferometer Space Antenna*

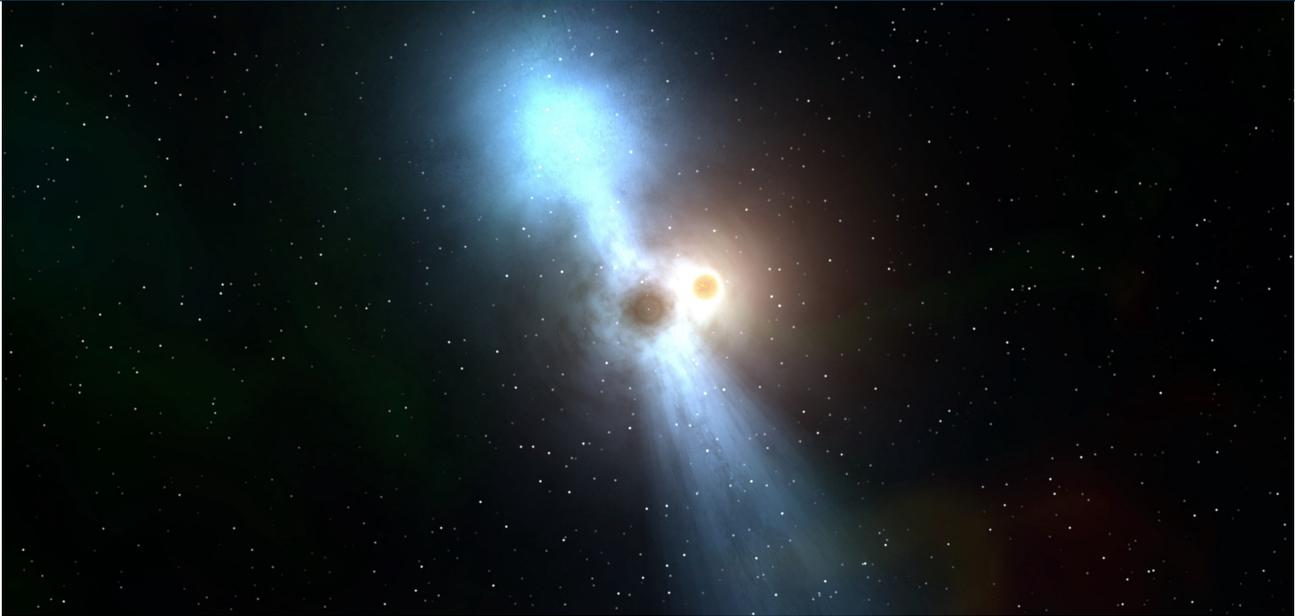


Figura 1. Representación artística del sistema binario formado por el púlsar PSR J2055+3829 y su estrella compañera, que está siendo vaporizada por la fuerte radiación de alta energía emitida por la estrella de neutrones (Michele Diodati/Universe Sandbox).

(LISA; Amaro-Seoane et al. 2017), nos sumergimos en las cientos —a veces miles, según la región— de épocas de datos del cielo del hemisferio norte facilitadas por la *Zwicky Transient Facility* (ZTF; Masci et al. 2019). Impusimos unos criterios de selección sensibles a objetos azules con luminosidades por debajo de la secuencia principal: se espera que los sistemas compuestos por dos enanas blancas con periodos orbitales lo suficientemente cortos para ser fuentes intensas para LISA posean temperaturas altas como consecuencia del calentamiento de marea (*tidal heating*; Fuller & Lai 2013). Como ejemplo de los resultados de este proyecto aún en marcha, en Burdge et al. (2020) presentamos quince sistemas con periodos orbitales comprendidos entre 6.91 y 56.35 minutos, medidos en las curvas de luz de ZTF usando el método de *conditional entropy* (Graham et al. 2013).

COMO EL DÍA Y LA NOCHE

Para nuestra sorpresa, ZTF J1406+1222 destacó entre el resto de los sistemas por mostrar una variabilidad casi sinusoidal de 62 minutos de periodo, cuya amplitud es mucho mayor en la banda g que en las bandas r o i de ZTF. La confirmación del periodo orbital vino en julio de 2020 con las curvas de luz obtenidas con la cámara CHIMERA (Harding et al. 2016) del Telescopio Hale de 200 pulgadas de diámetro en el Observatorio de Palomar. La de la banda g indicaba una amplitud del flujo de un factor cinco entre el mínimo y el máximo de luz. Este dato nos llevó a extender la fotometría a la banda u con ULTRACAM (Dhillon et al. 2007) en el *New Technology Telescope* (NTT; Observatorio de la Silla), que propor-

cionó una amplitud aún mayor. Finalmente, observamos ZTF J1406+1222 en el Gran Telescopio Canarias (GTC) de 10 metros con la cámara ultrarrápida HiPERCAM (Dhillon et al. 2021). La Fig. 2 ilustra la enorme amplitud de flujo que existe entre el mínimo (normalizado a uno en todas las bandas) y el máximo: un factor casi quince en la banda u_s de HiPERCAM. Ello implica un extraordinario contraste entre las caras “diurna” y “nocturna” de una estrella del sistema binario que está siendo intensamente irradiada por la otra componente. El máximo flujo nos llega cuando la primera está en la conjunción superior, es decir, cuando vemos de lleno su cara irradiada, mientras que el mínimo ocurre media órbita más tarde, en la conjunción inferior, cuando la estrella se dispone entre nosotros y el objeto que la está irradiando. Este efecto es típico de los sistemas de tipo viuda negra conocidos y, de hecho, se ha empleado como herramienta para encontrar algunos de ellos coincidentes con fuentes de rayos gamma (ver, p. ej., Li et al. 2021).

Si nos fijamos de nuevo en la Fig. 2, veremos claramente que el máximo de la modulación se alcanza antes en longitudes de onda más largas, lo que apunta a una distribución asimétrica de la temperatura en la superficie de la estrella irradiada. Estos desplazamientos del máximo dependientes del color no los vemos en sistemas binarios en los que el objeto que irradia es una enana blanca. Sin embargo, sí se han observado en “sistemas araña” como PSR J1959+2048 y PSR J2215+5135 (Kandel & Romani 2020), aunque el efecto es mucho más pronunciado en ZTF J1406+1222.

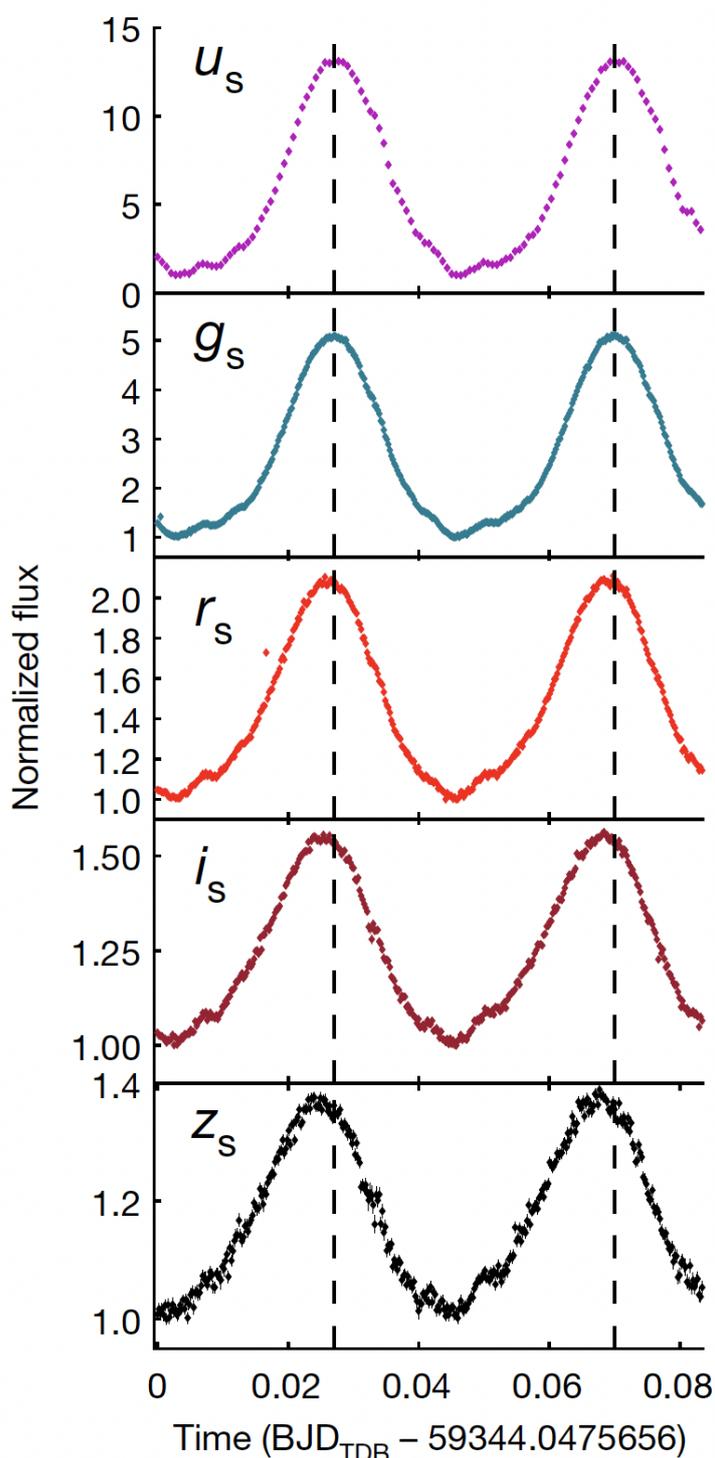


Figura 2. Curvas de luz de ZTF J1406+1222 en las cinco bandas de HiPERCAM. Las líneas verticales discontinuas marcan los máximos del brillo en la banda g_s . Se observa claramente cómo hacia longitudes de onda más largas el máximo se alcanza antes. Se ha usado el valor mínimo del flujo para la normalización en cada banda.

Una de las tandas de datos (observación número 00013598005) obtenidas con el filtro UVW2 del *Ultra-violet/Optical Telescope* (UVOT) a bordo del telescopio espacial *Neil Gehrels Swift Observatory*, de 1736 segundos de exposición en total, se obtuvo centrada en el mínimo de brillo, cubriendo la mitad de la órbita en que la fuente es más débil. La fotometría muestra que ZTF J1406+1222 no se detecta a un nivel de 3σ por encima del fondo, algo que impone un límite superior al brillo en esta banda de $> 22.9 \text{ mag}_{AB}$. Esta observación excluye aún más la posibilidad de que el objeto irradiador sea una enana blanca caliente ya que, de lo contrario, tendría que dominar el flujo en el ultravioleta lejano durante toda la órbita.

También usamos el *Low Resolution Imaging Spectrometer* (LRIS) en el Telescopio Keck I en Mauna Kea para conseguir espectros con resolución orbital (cinco minutos de exposición). En el panel de la derecha de la Fig. 3 se pueden observar los cambios drásticos que sufre el espectro visible de ZTF J1406+1222: en el mínimo de brillo (fase orbital 0) domina un continuo rojo que empieza a mostrar líneas de emisión estrechas de la serie de Balmer a medida que la órbita progresa (p. ej. fase 0.27 en la figura), que más tarde dan paso a una fase ópticamente gruesa con las líneas de Balmer en absorción sobre un continuo azul, que son visibles durante aproximadamente un tercio de la órbita y son más intensas cerca del máximo de brillo del sistema (alrededor de la fase 0.5). Nuestra interpretación es que las líneas de absorción se producen en la cara diurna de la estrella irradiada: la radiación de alta energía que recibe tiene el poder de penetrar lo suficiente en su fotosfera para que esta produzca líneas de absorción en el camino de vuelta de la energía reprocesada hacia la superficie (Romani et al. 2015). De nuevo, si el objeto irradiador fuera una enana blanca, su radiación, emitida principalmente en el ultravioleta, sería reprocesada muy cerca de la superficie de la estrella irradiada, lo que resultaría en un espectro ópticamente delgado de líneas de emisión estrechas, no de absorción.

Por otra parte, la curva de velocidad radial de las líneas de emisión estrechas indica que no tienen su origen en la cara diurna de la estrella irradiada, sino en un choque situado entre las dos componentes del sistema binario o en un viento arrancado de la estrella por el intenso bombardeo de radiación de alta energía al que está sometida, que podría disponerse en forma de una

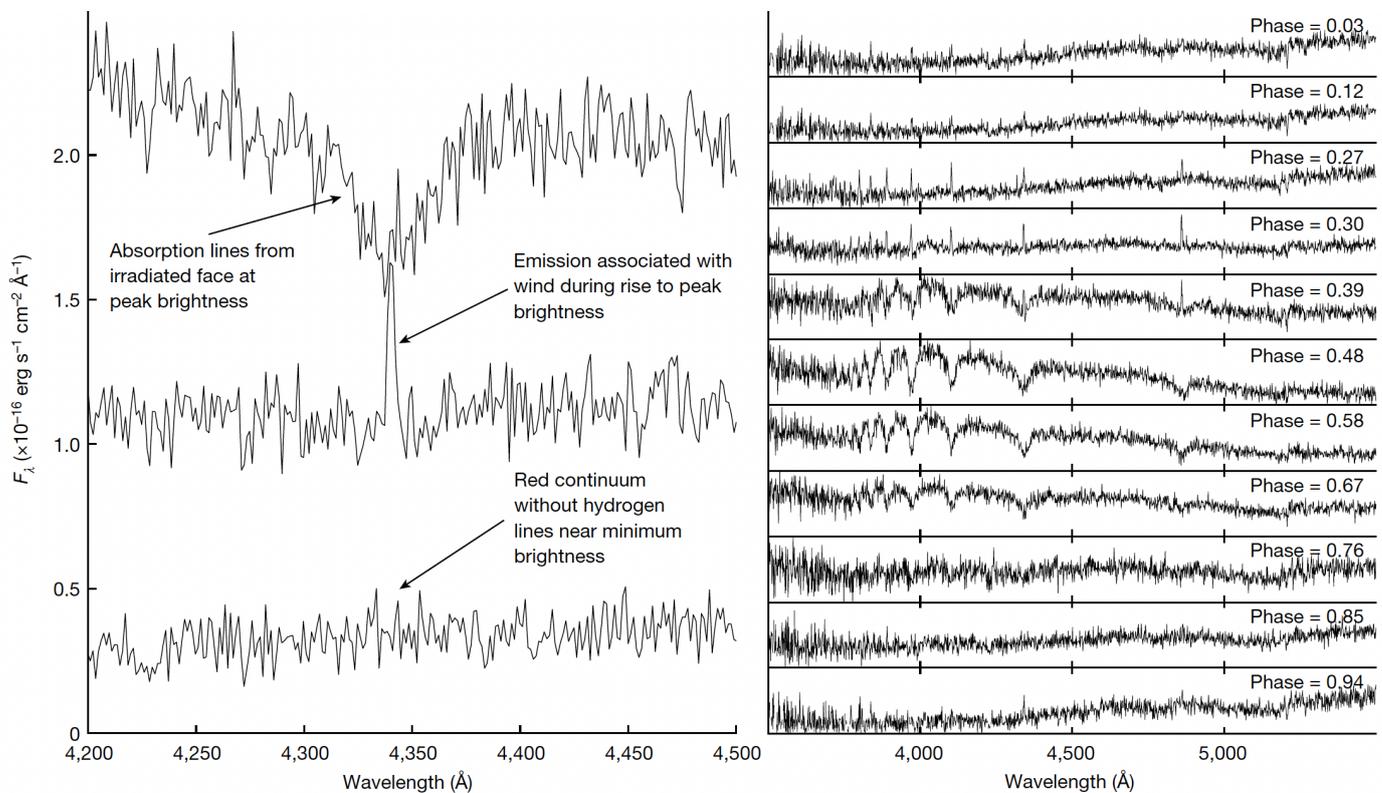


Figura 3. Izquierda: La línea espectral H γ en tres espectros diferentes obtenidos con el espectrógrafo LRIS del Telescopio Keck I. El superior, de mayor flujo, corresponde a una fase ópticamente gruesa que origina líneas de absorción de la serie de Balmer sobre un continuo azul. En una fase intermedia, H γ aparece como una emisión estrecha en un continuo rojo, mientras que en la fase más débil, abajo, el sistema no muestra las líneas espectrales de Balmer. Derecha: evolución del espectro de ZTF J1406+1222 a lo largo de la órbita del sistema binario. Cerca del mínimo del brillo se aprecia una línea de MgH en 5200 Å, que puede verse durante toda la órbita, típica de una estrella de tipo espectral K subenana.

cola similar a la de un cometa como la observada en el sistema de tipo viuda negra PSR J1311–343019 (ver fig. 7 en Romani et al. 2015). Todas estas evidencias juntas confirman que en ZTF J1406+1222 reside una viuda negra en la que la intensa radiación de alta energía de la estrella de neutrones está arrancando el material de su compañera (Burdge et al. 2022).

TRES SON COMPAÑÍA

El espectro tomado en la fase orbital 0.94 (el inferior en el panel derecho de la Fig. 3) no exhibe líneas de Balmer ni en absorción ni en emisión, sino una banda de absorción de MgH a una longitud de onda de unos 5200 Å que permanece durante toda la órbita. Esta característica espectral, junto con la detección de bandas de CaH más hacia el rojo, sugiere la presencia de una estrella subenana de tipo espectral K (Allard & Hauschildt 1995) con una temperatura efectiva medida de 3800–3900 K.

Tras inspeccionar las imágenes de archivo del *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) y el *Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System* (Pan-STARRS1) nos percatamos de que en la posición del objeto podría haber dos fuentes distintas separadas por una fracción de segundo de arco (Fig. 4). Sin embargo, el *Data Release 2* (DR2) de *Gaia* solo mostraba una fuente, pero el *Early Data Release 3* (DR3) sí distinguía dos fuentes en la posición medida por el DR2 separadas por 0.5555 ± 0.0045 segundos de arco, de modo que surgió la idea de que podíamos haber encontrado un sistema triple. La fuente de *Gaia* con una solución astrométrica completa es la estrella subenana, que tiene un movimiento propio de 74.486 ± 1.769 milisegundos de arco por año.

Suponiendo que ese fuera el caso, el sistema binario y la estrella subenana deberían compartir el mismo movimiento propio en el cielo, lo que demostramos

en la Fig. 5, confirmando así que ZTF J1406+1222 es un sistema triple compuesto por una binaria de tipo viuda negra y una estrella subenana de tipo K.

A una distancia estimada de 1.14 kilopársec, calculamos una separación proyectada entre la viuda negra y la estrella subenana de 600 unidades astronómicas, lo que implica un periodo orbital de aproximadamente 12000 años y una velocidad orbital proyectada de solo 1.5 km s^{-1} para la subenana.

ZTF J1406+1222 Y LOS MODELOS DE EVOLUCIÓN

Nuestro análisis cinemático de ZTF J1406+1222 (Burdge et al. 2022) revela que es muy probablemente un objeto del halo de nuestra Galaxia, de modo que su gran movimiento propio de 74.486 ± 1.769 milisegundos de arco por año refleja simplemente esa naturaleza, y no es un indicador de que la estrella de neutrones haya recibido un empujón en el momento de su nacimiento (*natal kick*). Esto implica que el sistema tiene varios miles de millones de años, por lo que la estrella de neutrones debe haberse formado hace mucho tiempo, dado que su estrella masiva progenitora tuvo que completar su evolución en un tiempo característico de unas decenas de millones de años. Es por lo tanto poco probable que el sistema

pueda haber sufrido un *kick* y haber mantenido la configuración que observamos ahora, ya que en tal caso el tercer cuerpo, con una velocidad de solo 1.5 km s^{-1} , habría sido expulsado del sistema fácilmente.

En resumen, la naturaleza triple y el periodo orbital tan corto de ZTF J1406+1222 somete los actuales modelos de evolución de las binarias de tipo araña (Chen et al. 2013) a una dura prueba. Además, es el único que se ha encontrado hasta ahora en el visible usando un método, ideado para el presente trabajo, de búsqueda de sistemas binarios con estrellas de neutrones basado en la modulación fotométrica que producen las estrellas compañeras fuertemente irradiadas. Ello posee el potencial de eliminar los efectos de selección de los métodos usados en trabajos anteriores, basados en la emisión en radio, rayos X o rayos γ .

BIBLIOGRAFÍA

- Wheeler, J. A. “[Superdense stars](#)”. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 4, 393 (1966).
- Fruchter, A. S., Stinebring, D. R. & Taylor J. H. “[A millisecond pulsar in an eclipsing binary](#)”. Nature, 333, 237 (1988).

Figura 4. Izquierda: Imagen de ZTF J1406+1222 en el DR9 de SDSS, que muestra una clara asimetría amarillo-azul/violeta en el color, con la estrella subenana de tipo K a la izquierda. Los dos cuadrados rojos indican las posiciones J2016.0 de las dos fuentes en el eDR3 de *Gaia*. Derecha: Imagen de Pan-STARRS1, que exhibe la misma asimetría en el color, y cuyo centroide se encuentra más cerca de la posición en *Gaia* a causa del movimiento propio del sistema de 74.5 milisegundos de arco por año.



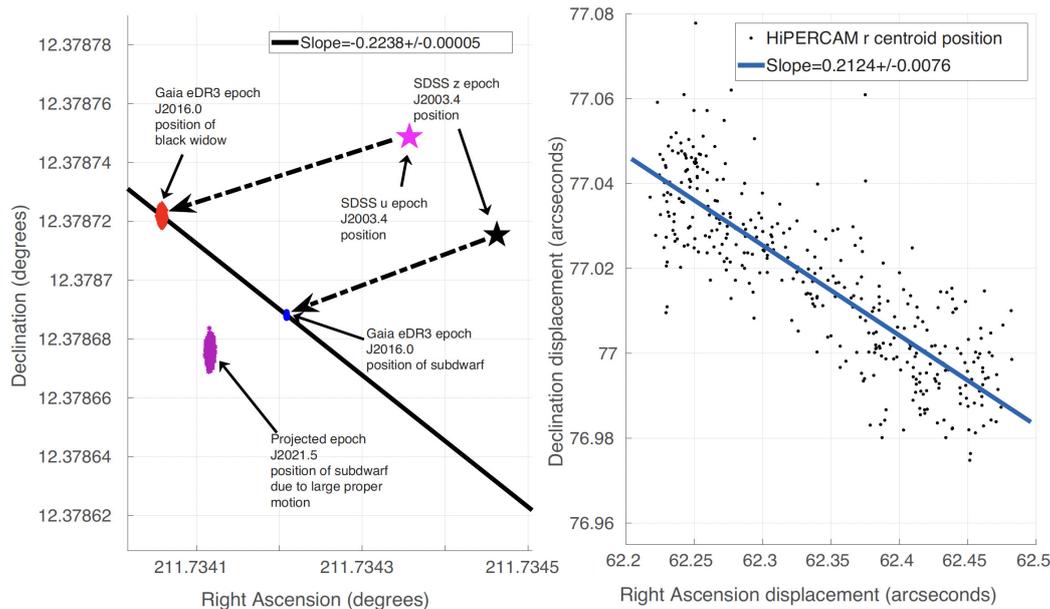


Figura 5. Izquierda: Las estrellas de color rosa y negro indican la posición en el cielo de la viuda negra (banda u) y la estrella subenana (banda z) en la época J2003.4 (SDSS DR9), respectivamente. Dado que la primera domina en la banda u y la segunda lo hace en la banda z , esas deberían ser las posiciones aproximadas de ambas fuentes en la época J2003.4. Por otro lado, los círculos azules marcan la posición de la estrella subenana en las imágenes de *Gaia* eDR3, mientras que los rombos rojos sitúan a la viuda negra (ambas en la época J2016.0). La línea negra continua ilustra el ángulo de posición entre esas dos posiciones. Las flechas discontinuas indican que ambos objetos comparten el mismo movimiento en el cielo. Las estrellas magenta reflejan la posición de la estrella subenana proyectada a la época J2021.5, cuando tomamos las imágenes con HiPERCAM, teniendo en cuenta su movimiento propio. Derecha: si ambos objetos comparten movimiento en el cielo, el ángulo de posición entre ellos debería mantenerse. Aprovechamos el hecho de que el sistema de tipo viuda negra se hace muy débil cada 62 minutos, lo que debería dejar a la vista solo la otra estrella del sistema triple: la estrella subenana. Así, medimos en las imágenes de HiPERCAM en la banda r el centroide del objeto tomando como referencia una estrella del campo, y comprobamos que saltaba entre dos posiciones, la de la viuda negra y la de la estrella subenana. Esto nos habilitó para medir el ángulo de posición de una respecto a la otra en la época en que tomamos las imágenes (J2021.5), comprobando que se mantenía respecto al medido usando *Gaia* eDR3, y confirmando así la naturaleza triple del sistema.

- Linares, M., Shahbaz, T. & Casares J. “Peering into the dark side: Magnesium lines establish a massive neutron star in PSR J2215+5135”. *ApJ*, 859, 54 (2018).
- Masci, F. J. et al. “The Zwicky Transient Facility: Data processing, products, and archive”. *PASP*, 131, 995 (2019).
- Amaro-Seoane, P. et al. “Laser Interferometer Space Antenna”. *arXiv:1702.00786* (2017).
- Burdge, K. B. et al. “A systematic search of Zwicky Transient Facility data for ultracompact binary LISA-detectable gravitational-wave sources”. *ApJ*, 905, 32 (2020).
- Fuller, J. & Lai, D. “Dynamical tides in compact white dwarf binaries: helium core white dwarfs, tidal heating and observational signatures”. *MNRAS*, 430, 274 (2013).
- Graham, M. J. et al. “Using conditional entropy to identify periodicity”. *MNRAS*, 434, 2629 (2013).
- Harding, L. K. et al. “CHIMERA: a wide-field, multi-colour, high-speed photometer at the prime focus of the Hale telescope”. *MNRAS*, 457, 3036 (2016).
- Dhillon, V. S. et al. “ULTRACAM: an ultrafast, triple-beam CCD camera for high-speed astrophysics”. *MNRAS*, 378, 825 (2007).
- Dhillon, V. S. et al. “HiPERCAM: a quintuple-beam, high-speed optical imager on the 10.4-m Gran Telescopio Canarias”. *MNRAS*, 507, 350 (2021).
- Li, K.-L. et al. “Revealing a new black widow binary 4FGL J0336.0+7502”. *ApJ*, 911, 92 (2021).
- Kandel, D. & Romani, R. W. “Atmospheric circulation on black widow companions”. *ApJ*, 892, 101 (2020).
- Romani, R. W., Filippenko, A. V. & Cenko, S. B. “A spectroscopic study of the extreme black widow PSR J1311–3430”. *ApJ*, 804, 115 (2015).
- Allard, F. & Hauschildt, P. H. “Model atmospheres for M (sub)dwarf stars. I. The base model grid”. *ApJ*, 445, 433 (1995).
- Chen, H.-L. et al. “Formation of black widows and redbacks—two distinct populations of eclipsing binary millisecond pulsars”. *ApJ*, 775, 27 (2013).
- Burdge, K. B. et al. “A 62-minute orbital period black widow binary in a wide hierarchical triple”. *Nature*, 605, 41 (Springer Nature 2022).

EL CAMINO DE SANTIAGO:

A lo largo de la historia de la humanidad, las distintas culturas incorporaron cuerpos y fenómenos celestes a su folclore, dando cuenta de su interés y fascinación por el firmamento. Hoy en día, incluso cuando la observación de los movimientos de los astros no es necesaria en nuestro día a día para la ubicación en el tiempo y en el espacio, seguimos embelesados ante la imagen del cielo nocturno.



Maitane Urrutia-Aparicio
Instituto de Astrofísica de Canarias
murrutia@iac.es

Juan A. Belmonte
Instituto de Astrofísica de Canarias
jba@iac.es

A. César González-García
Instituto de Ciencias del Patrimonio, CSIC
a.cesar.gonzalez-garcia@incipit.csic.es

El sol, el astro rey, ha sido el gran protagonista en muchas de las leyendas. Desde los albores del cristianismo se hace patente el simbolismo asociado al sol naciente, identificando a Jesucristo con el Sol de Justicia, que brillará al final de los tiempos, y Oriente alude al paraíso, el lugar de los justos. El sol es por tanto un símbolo de luz, vida, justicia y salvación en la religión cristiana.

La propia iglesia, como templo, representaría un microcosmos, una reproducción de la Tierra y el Cielo (Davy & Pascual, 1996): la forma cuadrada estaría basada en los cuatro puntos cardinales, los elementos, las estaciones o los evangelistas, mientras que la circular, como la cúpula, sería la bóveda celeste. Su orientación *ad orientem* es uno de los mayores ejemplos de este pensamiento simbólico. Las prescripciones para la oración y los rituales de las antiguas comunidades cristianas indicaban, de forma ambigua, que los fieles y el sacerdote debían dirigirse hacia el este, en la dirección del sol naciente. La orientación, escogida cuidadosamente, podía crear una atmósfera única que diera lugar a fenómenos de iluminación que ensalzaran alguna de las características del templo, como el altar.

De hecho, el estudio de los patrones de orientación ha demostrado ser una herramienta poderosa que nos permite profundizar en la relación entre la astronomía y la cultura en el contexto de los paisajes terrestres y celeste (Belmonte y Hoskin, 2002). Este enfoque es intrínseco a la disciplina de la "Arqueo-astronomía", que se enmarca dentro de la "Astronomía Cultural" (Belmonte, 2021; González-García, 2022) y la estudia a través de restos materiales, especialmente vestigios arquitectónicos, pero sigue siendo una ciencia que indaga sobre cuestiones culturales o sociales (Ruggles, 2011) y las percepciones humanas del cielo (Iwaniszewski, 2009).

El análisis de las orientaciones de los templos cristianos puede aportar información sobre si efectivamente siguieron la dirección del sol naciente en su construcción, tal y como rezaban las prescripciones, e incluso, si así fuera, a qué interpretación de 'oriente' correspondían, ya que el uso de un *gnomon* o la observación del movimiento del sol sobre el horizonte dan lugar a diferentes patrones de orientación reconocibles y distinguibles entre sí.

Entre los siglos XI y XIII en la Península Ibérica comenzó a propagarse el estilo artístico y arquitectónico conocido como “románico”, que aparece como consecuencia del proceso de desarrollo religioso, social y político que tuvo lugar al comienzo del nuevo milenio. La renovada importancia de los monasterios e iglesias atrajo especialmente nuevos recursos económicos que dieron lugar a este nuevo estilo, en el que además repercutieron el culto a las reliquias y las peregrinaciones. Se trata una época profundamente influenciada por órdenes monásticas como Cluny, proveniente de Francia, que promovieron la ruta jacobea y la implantación de la reforma eclesíástica que se estaba llevando a cabo en aquel momento.

No cabe duda de que el Camino de Santiago fue un fenómeno de peregrinación clave de los siglos XI y XII, que supuso una vía para el intercambio de ideas y corrientes artísticas. Este paisaje cultural se configuró alrededor de una serie de elementos, como son las reliquias, leyendas y milagros que la convirtieron en un espacio sagrado para el peregrino. Igualmente se pueden encontrar relaciones del Camino con el firmamento: son varios los siglos que han transcurrido desde que se iniciara la leyenda de la aparición del apóstol Santiago en los sueños de Carlomagno, instándole a seguir un camino de estrellas que le conduciría a su sepulcro en Galicia. Ante esta narrativa, no es de extrañar que en muchos lugares de España se conozca a la Vía Láctea con el nombre de Camino de Santiago.

Siendo este estilo tan prolífico en el norte peninsular, se pueden tomar las iglesias románicas a lo largo de una de las rutas jacobeanas, como el Camino Francés, para establecer una muestra estadísticamente significativa que permita analizar los patrones de orientación, que darían cuenta de las posibles diferencias y similitudes regionales, así como del potencial uso del Camino como entrada y vía de propagación de las nuevas corrientes culturales.

Tras varias campañas en 2019 e incluso en 2020, en plena pandemia por la Covid-19, se pudieron tomar las medidas de la orientación de casi tres centenares de iglesias románicas en los antiguos reinos cristianos de León, Castilla, Navarra y Aragón, cuyos ejemplos se muestran en la Figura 1. Estas presentan, en general, una concentración de

orientaciones a levante desviada ligeramente hacia el norte, de forma similar a los patrones encontrados para sus predecesoras mozárabes, lo que podría indicar una cierta continuidad temporal. Los patrones encontrados parecen descartar las orientaciones aleatorias a oriente, siendo los días del equinoccio y la Pascua las fechas predominantes, aunque con discrepancias regionales.

Debido a los conflictos entre los reinos cristianos del norte entre sí y con los musulmanes en el sur, las fronteras estaban en un cambio constante, y los territorios podían diferir del área de influencia de las diócesis. De esta forma, el intercambio cultural podría tener lugar gracias a la proximidad, o a ciertas influencias políticas o religiosas. Para excluir cualquier límite cultural, político o religioso y, por lo tanto, realizar un análisis libre de suposiciones, se realizó el “mapa de frecuencias de declinación”, que se ve en la Figura 2 (Urrutia-Aparicio et al., 2022).

Este diagrama permite conocer la probabilidad de encontrar un cierto valor de declinación dependiendo de la longitud geográfica y, además, comparar la orientación de las iglesias considerando la continuidad física de la ruta jacobea a lo largo del norte peninsular. Esto es posible ya que la latitud geográfica es similar en las distintas paradas del Camino Francés, con la excepción del tramo aragonés de Canfranc a Jaca, donde la ruta penetra en dirección norte-sur desde Francia a través de los Pirineos, y por tanto las iglesias se concentran en valores similares de longitud, pero latitud ligeramente diferente.

En el antiguo reino de León, el máximo principal sugiere la preferencia por la salida del Sol el día del equinoccio eclesíástico del 21 de marzo, similar a las iglesias prerrománicas de Galicia (González-García, 2015). Esto tal vez podría relacionarse con el proceso de cristianización local temprana (García Quintela et al., 2014), donde se puede destacar a San Martín de Dumio, con gran influencia en estas tierras y que escribe en contra de las prácticas paganas señalando la preferencia del 25 de marzo como el equinoccio y el comienzo del año. Aparece, en segundo lugar, un máximo relacionado con el amanecer en uno de los Domingos de Resurrección más repetidos en la Península Ibérica durante los siglos del románico.

En el vecino reino de Castilla, por el contrario, las iglesias del Camino presentan fundamentalmente orientaciones pascales, probablemente obtenidas mediante observación directa del sol en el horizonte. En el curvigrama de la Figura 2 (arriba) se han comparado las distribuciones de las orientaciones de las iglesias de la ruta jacobea con una distribución correspondiente a las fechas más probables de la Pascua. Para ello, se confeccionó una lista con las fechas del domingo de Pascua comprendidas entre los siglos XI y XIII y se contó el número de repeticiones de cada una de las fechas. Uno de los máximos principales de las iglesias del Camino concuerda con

el curvigrama de la Figura 2, en naranja, el cual representa estos máximos pascales. En concreto, tiene una forma de tres picos que parece reproducirse en las orientaciones de las iglesias del reino de Castilla.

Avanzando hacia los reinos orientales de la ruta jacobea, Navarra muestra un máximo predominante hacia el equinoccio astronómico. Curiosamente, esta orientación parece no haberse obtenido mediante la observación directa del sol, sino que posiblemente utilizó un método indirecto como un *gnomon*. En este reino la Pascua vuelve a aparecer, una vez más, como objetivo secundario.

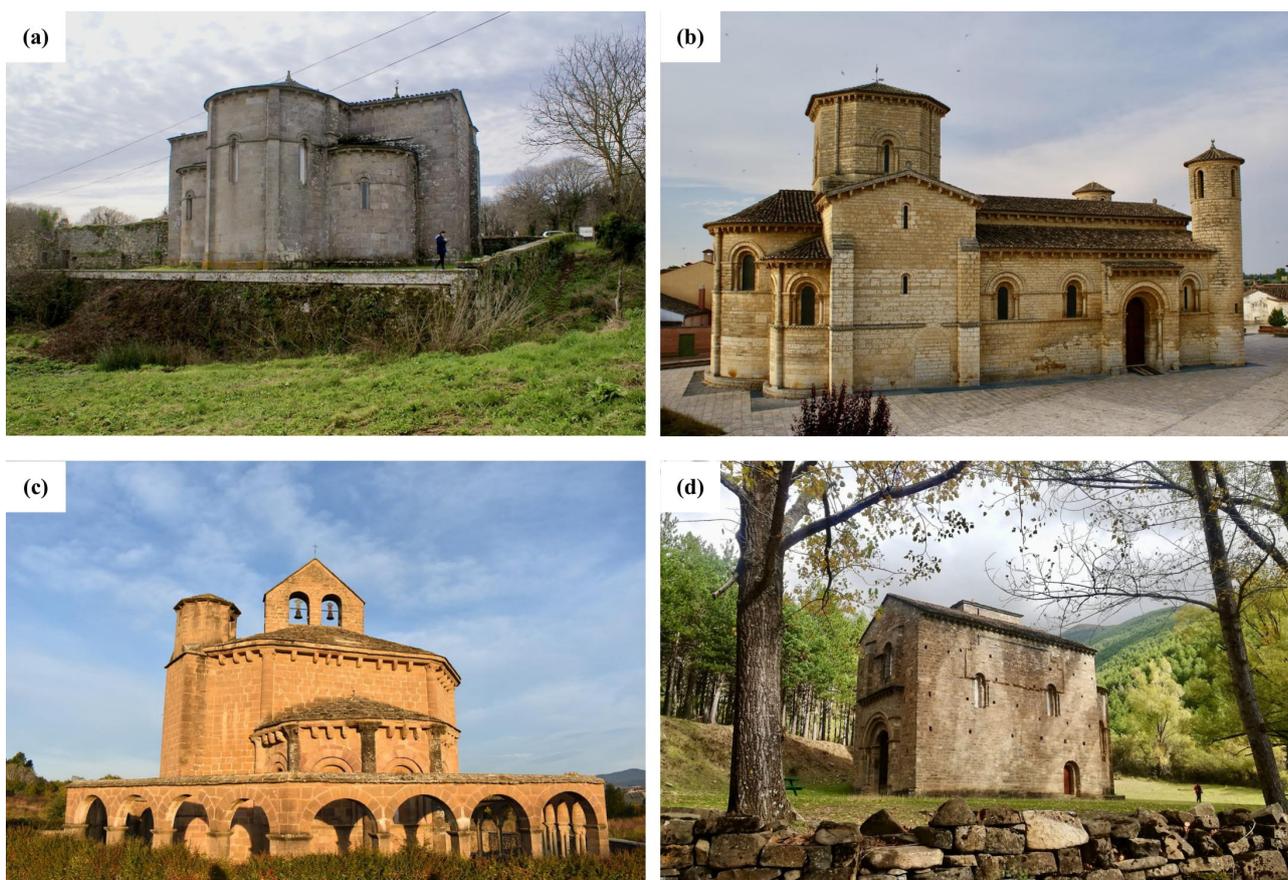


Figura 1. Ejemplos de iglesias románicas a lo largo del Camino de Santiago: (a) San Salvador Vilar de Donas en el antiguo reino de León, (b) San Martín de Tours de Frómista en Castilla, (c) Santa María de Eunate en Navarra y (c) Santa María de Iguácel en Aragón. Imágenes de los autores.

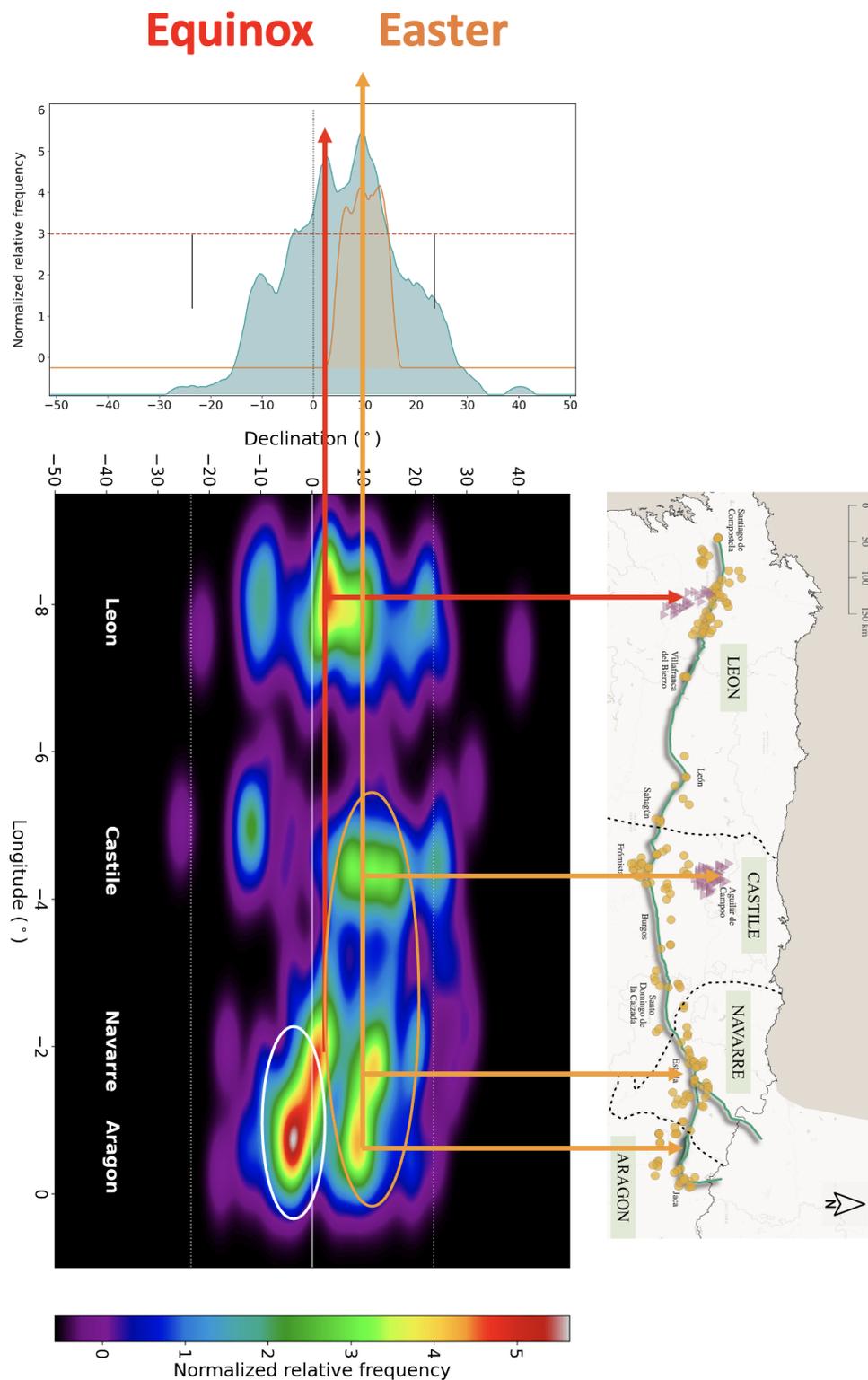


Figura 2. Mapa de frecuencias de declinación de las iglesias románicas en el Camino Francés, comparada arriba con el curvograma de declinaciones de las iglesias del Camino en azul y la distribución de las fechas de Pascua en los siglos del Románico en naranja, y a la derecha el mapa con la ubicación de las iglesias (en círculos amarillos, las iglesias de la ruta jacobea, en triángulos rosas las muestras de contraste, cuyas declinaciones no han sido representadas). La ubicación de las iglesias queda representada en función de su longitud geográfica, puesto que la latitud es similar en toda la ruta jacobea. Los máximos significativos se encuentran en color verde, amarillo y rojo, de menor a mayor significancia. Las líneas blancas discontinuas muestran los solsticios de verano e invierno, mientras que la línea continua los equinoccios de primavera y otoño. Adaptada de Urrutia-Aparicio et al. (2022).

Por último, las iglesias de Aragón forman un conjunto singular, con alineaciones pascales posiblemente tanto hacia la salida como hacia la puesta del sol del día elegido. No se trata de un caso aislado. Al separar en cada reino las iglesias pertenecientes al Camino y las de los grupos de contraste, se pudieron obtener detalles que en un análisis global pasarían desapercibidos. Estos son los casos de la Montaña Palentina, los valles de Arán y del Bohí, e incluso Álava y Burgos, donde se encontraron, al igual que en Aragón, iglesias con orientación pascual a poniente, en lugar de a levante.

De entre todas las hipótesis estudiadas, dos de ellas podrían dar una explicación al fenómeno. Por un lado, las condiciones climatológicas que, en estas zonas montañosas, pudieran influir en la elección del atardecer en lugar del amanecer. Por otro lado, sin que excluya el anterior razonamiento, se encontraría la posible celebración de la Vigilia Pascual el Sábado Santo, la víspera del Domingo de Resurrección. Su comienzo no tiene una hora exacta, aunque según el Misal Romano tiene que ser posterior al ocaso y previo al amanecer. La puesta de sol podría estar actuando como un marcador, a partir del cual se darían comienzo a los ritos propios de la vigilia. No sería descabellado pensar, por tanto, que la orientación hacia el ocaso solar en un día tan señalado pudiera ser tenida en cuenta por los constructores de las iglesias. Esto aportaría un carácter religioso a la decisión de orientar iglesias a poniente, que además es compatible con la hipótesis del clima. Este planteamiento requiere de un estudio más detallado de las fuentes, ya que por el momento no se han encontrado textos que indiquen la hora de comienzo de la vigilia en cada una de las iglesias.

Varios factores, principalmente relacionados con la influencia local de la orden cluniacense, podrían haber sido los responsables de tales diferencias entre reinos. Uno de ellos podría tratarse de la sustitución paulatina del rito tradicional visigodo o hispano (también llamado mozárabe) por el rito romano como parte de la reforma eclesiástica iniciada en tiempos del papa León IX (1049-1054) y promovida por el papa Gregorio VII (1073-1085). Sin embargo, este cambio no tuvo lugar en el mismo momento en todos los territorios cristianos, lo cual podría verse reflejado en la orientación de las iglesias.

A través de este trabajo, y bajo la perspectiva de la Astronomía Cultural, se han podido establecer varias cuestiones fundamentales. La visión detallada de los patrones de orientación a lo largo de la ruta jacobea ha dado pie a establecer diferencias y similitudes entre los distintos reinos cristianos, y a evaluar la influencia de las tradiciones previas locales, las nuevas corrientes externas e incluso la introducción gradual de la liturgia romana, mostrándose así como un elemento catalizador para el estudio no sólo de los rituales sino también de la práctica política y el poder.

Finalmente, se ha podido comprobar que el Domingo de Pascua, una festividad crucial en el calendario litúrgico cristiano, parece trasladarse a la construcción de estos lugares sagrados del Camino en los siglos del románico a través del orto solar en ese día (Urrutia-Aparicio et al. 2021). En ese sentido, se ha demostrado por vez primera la relevancia de la Pascua en la orientación de las iglesias analizando el caso de los templos románicos del Camino de Santiago, dotando al patrimonio cultural de la ruta jacobea de una dimensión complementaria, que es la astronómica, que refuerza el valor universal excepcional de este paisaje cultural declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO.

NOTA

Los resultados aquí expuestos constituyen el núcleo fundamental de la tesis doctoral de Maitane Urrutia, supervisada por Juan Antonio Belmonte y César González-García, que será defendida próximamente.

REFERENCIAS

- Belmonte, J.A. (2021). Archaeoastronomy / Cultural Astronomy. Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science. Oxford: OUP. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190647926.013.215>
- Belmonte, J. A. y Hoskin, M. (2002). Reflejo del cosmos: Atlas de arqueoastronomía en el Mediterráneo antiguo. Madrid: Equipo Sirius.
- Davy, M. M., & Pascual, M. (1996). Iniciación a la simbología románica: el siglo XII. Madrid: Ediciones Akal.
- García Quintela, M. V., González-García, A. C., Seoane-Veiga, Y. (2014). De los solsticios en los castros a los santos cristianos. La creación de los paisajes cristianos en Galicia. *Madrider Mitteilungen*, 55, 443–485.
- González-García, A. C. (2015b). La orientación de las iglesias prerrománicas de Galicia: análisis y resultados preliminares. *Estudos do Quaternário/Quaternary Studies*, (12), 133–142.
- González-García, A.C. (2022). Traveling between Natural and Human Sciences: A Professional Voyage Toward Cultural Astronomy, in *The Oxford Handbook of Cognitive Archaeology*. K.A. Overmann, F.L. Coolidge and T. Wynn (eds.) Oxford: OUP. [10.1093/oxfordhb/9780192895950.013.40](https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780192895950.013.40)
- Iwaniszewski, S. (2009). Por una astronomía cultural renovada. *Complutum*, 20 (2), 23–37.
- Ruggles, C. (2011). Pushing back the frontiers or still running around the same circles? 'Interpretative archaeoastronomy' thirty years on. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 7 (S278), 1–18.
- Urrutia-Aparicio, M., González García, A.C., Belmonte J.A. (2021) East or Easter? keys to the orientation of Romanesque churches along the way of Saint James. *Journal for the History of Astronomy* 52, 289-310.
- Urrutia-Aparicio, M., Belmonte, J. A., González-García, A. C. (2022). Land-and skylscapes of the Camino de Santiago: An Astronomy and World Heritage sustainable approach. *Sustainability*, 14 (5), 3047.

TARSIS, ESPECTROSCOPIA BIDIMENSIONAL

A finales de 2026 estará disponible en el telescopio de 3,5m del observatorio de Calar Alto el instrumento TARSIS, una unidad de campo integral (IFU) de campo y cobertura espectral sin precedentes (8 arcmin^2 entre 320 y 810 nm). TARSIS, que fue seleccionado por el observatorio como el instrumento de nueva generación para el 3,5m en mayo de 2022, está siendo diseñado para llevar a cabo CATARSIS, una exploración que mapeará durante 6 años un total de 16 cúmulos de galaxias entre $0.15 < z < 0.23$ hasta su radio virial de forma no sesgada.



Armando Gil de Paz

Universidad Complutense de Madrid
agil@fis.ucm.es

Jorge Iglesias Páramo

Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC)
jiglesia@iaa.es

Patricia Sánchez-Blázquez

Universidad Complutense de Madrid
psanchezblazquez@ucm.es

TARSIS, EL INSTRUMENTO

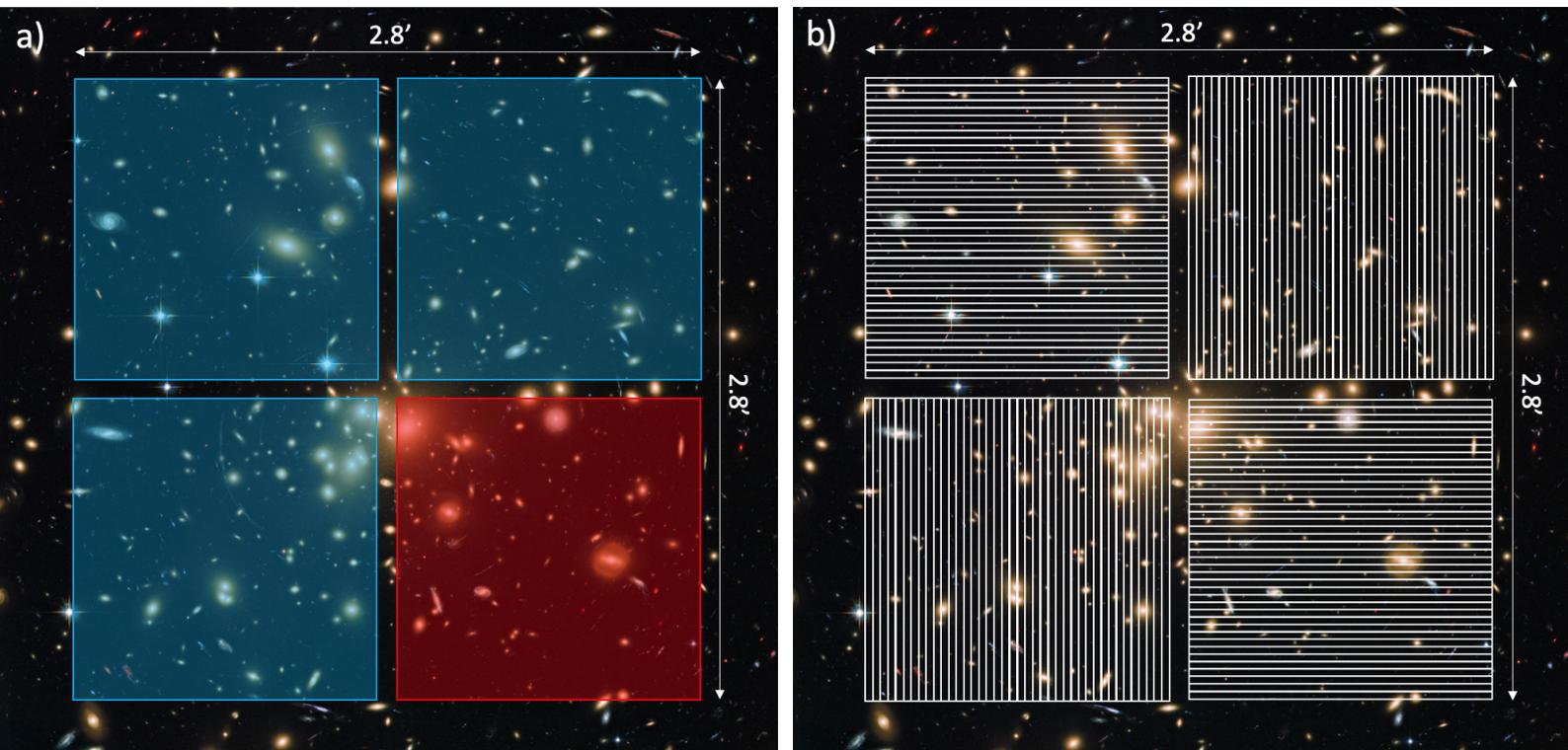
Además de hacer referencia a distintos lugares del sur de la península ibérica (ya sean las colonias fenicias diseminadas por la costa de la actual Andalucía o la mítica ciudad capital del reino de Tartessos) o los barcos usados por los primeros para explorar las regiones más occidentales del Mediterráneo, TARSIS es el acrónimo del instrumento de nueva generación para el telescopio de 3,5m del observatorio de Calar Alto: *Tetra-ARmed Super-Ifu Spectrograph*.

TARSIS es una unidad de campo integral (o IFU, del inglés Integral Field Unit) basada en la técnica de rebanado de imagen que proporcionará espectroscopía de resolución intermedia-baja (su poder de resolución promedio será de $R \sim 1000$) en un campo de visión sin precedentes de unos 8 minutos de arco cuadrados. Este campo es unas 12 veces más grande que el de la IFU de mayor campo disponible en el observatorio (PPaK; Verheijen et al. 2004) y unas 8 veces más grande que el proporcionado por la mayor IFU disponible a la comunidad española: MUSE en el VLT (Bacon et al. 2010). El campo total de TARSIS se divide en cuatro cuadrantes adyacentes, cada uno de ellos con cobertura espacial completa (*filling factor* = 100%), y una resolución espacial de $2''$ (ancho de la rebanada) $\times 2''$ (calidad de imagen a lo largo de cada rebanada). Tres de los cuadrantes redirigen la luz a sendos espectrógrafos optimizados para cubrir el rango azul del espectro óptico, entre 320 y 520 nm, mientras que el cuarto cuadrante permite cubrir el rango rojo, entre 510 y 810 nm (ver imagen). Estos espectrógrafos proporcionarán resoluciones espectrales entre 700 y 1200 en poder de resolución ($R = \lambda / \Delta\lambda$), dependiendo de la longitud de onda.

Los principales parámetros del instrumento se resumen en la tabla que se muestra en la página siguiente.

La gran cobertura espacial junto con la más que adecuada resolución espacial y espectral de TARSIS se derivan de los requerimientos científicos del proyecto CATARSIS (acrónimo de *Calar Alto Tetra-ARmed Super-Ifu Survey*). Así, la convocatoria abierta en la que fueron recientemente elegidos CATARSIS y TARSIS era realmente una llamada para nuevos proyectos científicos para ser realizados con instrumentación ya existente o de nueva construcción, en el caso de que ésta no estuviese aún

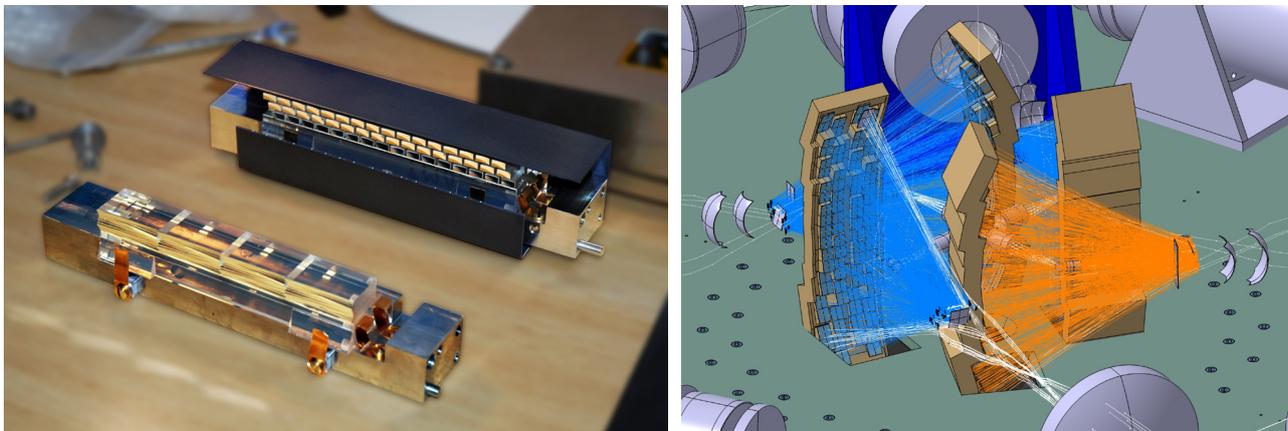
DE GRAN CAMPO PARA CALAR ALTO



a) Disposición de los cuatro cuadrantes/espectrógrafos de TARSIS (3 azules y 1 rojo) sobre una imagen de falso color del Hubble Space Telescope con el instrumento ACS/WFC del cúmulo Abell 1689. Crédito: NASA, ESA, Hubble Heritage Team (STScI/AURA), J. Blakeslee (NRC Herzberg Astrophysics Program, Dominion Astrophysical Observatory) y H. Ford (JHU). b) 160 rebanadas (slitlets) en las que se descompondrá el campo cubierto en un apuntado por TARSIS sobre la misma imagen de Abell 1689. Nótese que esta imagen representa una pequeña parte de la región del cúmulo dentro de su radio virial.

Principales parámetros del instrumento TARSIS.

	Azul	Rojo
Campo de visión	3 x (1,36 x 1,36) arcmin ²	1,36 x 1,36 arcmin ²
Rango espectral	320 nm – 520 nm	510 nm – 810 nm
Elemento de resolución espacial	2,05 x 2,05 arcsec ²	2,05 x 2,05 arcsec ²
Poder de resolución espectral (R)	730 – 1260	780 – 1220
Detector	CCD231 con Silicio estándar (con recubrimiento NBB)	CCD231 Si <i>Deep depleted</i> (con recubrimiento MK15)
Eficiencia total (incluye rebanador + espectrógrafo + detector)	mín.: 9%; máx.: 32%	mín.: 24%; máx.: 38%



a) Rebanador de imagen del instrumento MUSE del VLT. El rebanador propiamente dicho, compuesto de 48 espejos esféricos fuera de eje de 0,9mm de grosor cada uno, se muestra al frente mientras que al fondo está el espejo de reenfoque, también compuesto de 48 espejos esféricos fuera de eje (créditos: ESO/CRAL). b) Diseño de los cuatro rebanadores de imagen de TARSIS (tres en el rango azul y uno en el rango rojo).

disponible en el observatorio de Calar Alto. En otras palabras, TARSIS surge como una necesidad derivada de CATARSIS y no al revés.

En las siguientes secciones describimos brevemente las características de los diferentes subsistemas de TARSIS, así como los principales objetivos de su caso científico: CATARSIS. Al final de este especial describimos también el calendario del proyecto, tanto en lo referente al desarrollo y construcción del instrumento, como a la obtención, análisis y diseminación de los datos y resultados que se derivarán de la ejecución de la exploración CATARSIS.

TARSIS, SUBSISTEMA POR SUBSISTEMA

El uso de rebanadores de imagen requiere reconvertir el haz del telescopio (con relación focal $f/10$ en su foco Cassegrain) a un haz más lento, adecuado a la envolvente del foco y con un viñeteo mínimo entre las diferentes caras del rebanador. En la imagen se muestra el sistema de fileteado y enfoque del instrumento MUSE del VLT. En el caso de TARSIS esto implica convertir el foco $f/10$ en un sistema $f/20$ que se rebana a la vez que se focaliza de nuevo a $f/9$. Finalmente, un sistema doble de lentes genera el plano focal de entrada de cada uno de los espectrógrafos, con número $f/3$, plano y telecéntrico. El diseño, salvo por los recubrimientos anti-reflectantes,

es idéntico para los cuatro brazos. Nótese que cada rebanador reordena un total de 40 rebanadas en forma de dos pseudo-rendijas paralelas situadas a la entrada del colimador. El diseño del rebanador ha sido realizado por la empresa FRAC-TAL S.L.N.E., y su fabricación correrá a cargo de la empresa Bertin-Winlight, responsable también de la fabricación de los rebanadores de imagen para MUSE en el VLT, KCWI en Keck II, entre otros.

Los espectrógrafos de TARSIS (3 en el azul y 1 en el rojo) están optimizados en su diseño óptico para su correspondiente rango de operación: 320-520 nm para los 3 espectrógrafos azules y 510-810 nm para el espectrógrafo rojo. Ambos son sistemas colimador-cámara que usan redes de dispersión holográficas (VPH, del inglés *Volume Phase Holographic*) de alta eficiencia. Los colimadores son $f/3$ mientras que las cámaras trabajan a $f/1.5$, similares en ese sentido a los componentes del espectrógrafo del instrumento MEGARA para GTC. En el caso de cada uno de los espectrógrafos azules, los colimadores tienen 6 lentes, y las cámaras poseen 9, incluyendo un triplete y un doblete. Debido a la necesidad de llegar hasta 320 nm todos los elementos ópticos, salvo un elemento de la cámara, están compuestos de Sílice Fundido o Fluoruro de Calcio. En el caso del espectrógrafo rojo, el colimador tiene 4 lentes (incluido

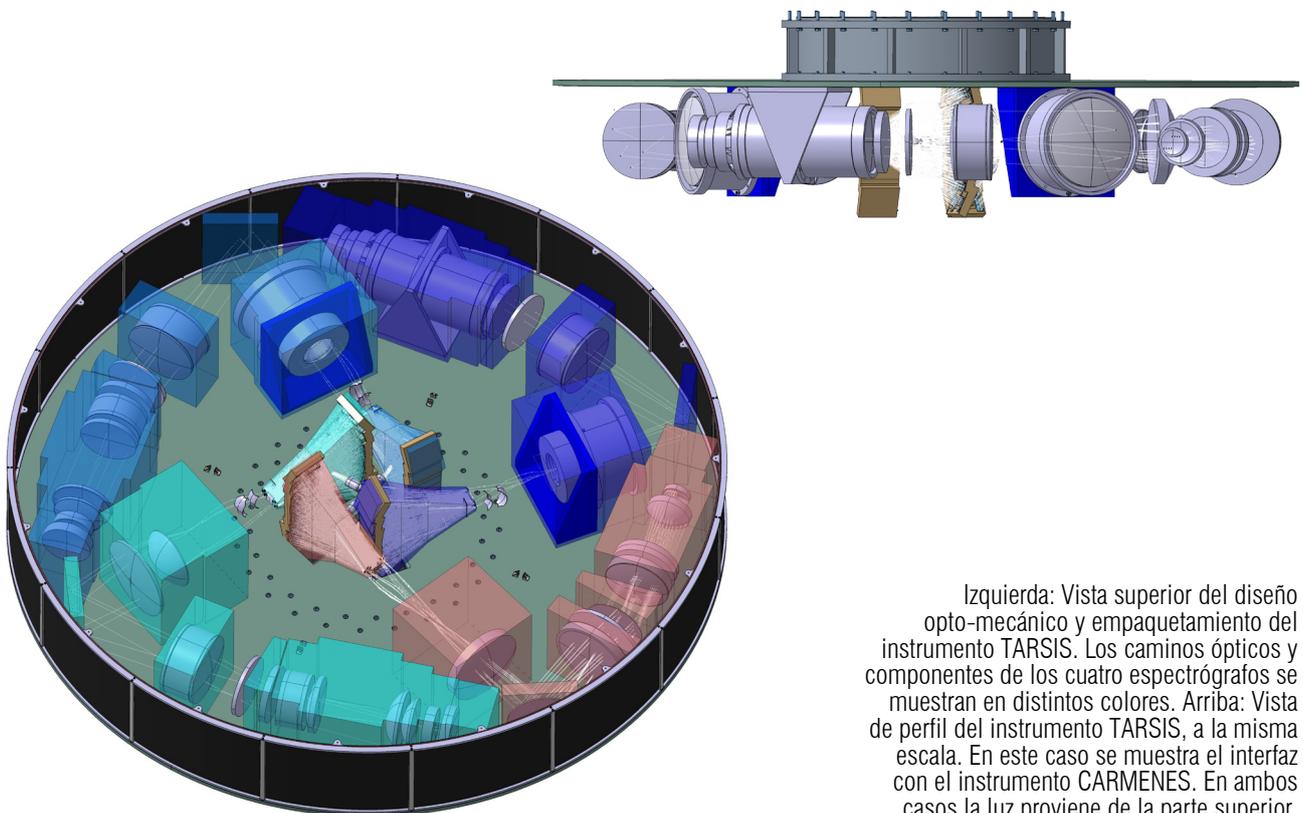
un doblete) y la cámara 7 (incluidos 2 dobletes), de distintos materiales: S-LAH53, S-BSM81, CaF2, S-BAL12, etc. Los espectrógrafos han sido diseñados por la empresa española FRACTAL S.L.N.E. y serán fabricados por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE, México).

Debido a que se usan dobles rendijas, cada VPH lleva un filtro incorporado que evita el solape espectral sobre el detector. El diseño y desarrollo de la VPH de doble holograma para los espectrógrafos de TARSIS está siendo llevado a cabo por la empresa Wasatch Photonics.

En el plano focal de la cámara de cada uno de los 4 espectrógrafos se sitúan sendos detectores CCD231 fabricados por la empresa Teledyne de 4k x 4k píxeles de 15 micras de tamaño lateral. Los CCDs para los espectrógrafos azules son de tipo delgado iluminados por detrás con un recubrimiento denominado NBB (*New Broad Band*) que alcanza

una transmisión del 70% a 320 nm sin bajar del 80% más allá de 350 nm y hasta el límite rojo de los espectrógrafos a 520 nm. Por su parte, el brazo rojo incorpora un CCD231-84 tipo *Deep Depleted* con recubrimiento tipo ML15 que posee eficiencias por encima de 80% en prácticamente todo el rango, de 510 a 810 nm. Este detector es similar al usado actualmente en los instrumentos CARMENES, MEGARA o MUSE. La lectura de cada CCD se realizará por dos amplificadores diagonalmente opuestos mediante el uso de dos controladores Archon. El enfriado de cada CCD se conseguirá por medio de un sistema *Stirling* con control anti-vibratorio activo (AVC) de la empresa Cryotel.

La disposición del instrumento completo en el foco del telescopio se muestra en la figura. Aunque no incluido en esta figura, el instrumento cuenta con un módulo de Adquisición y Guiado y una Unidad de Calibración, que son ambas responsabilidad del IAA-CSIC.



Izquierda: Vista superior del diseño óptico-mecánico y empaquetamiento del instrumento TARSIS. Los caminos ópticos y componentes de los cuatro espectrógrafos se muestran en distintos colores. Arriba: Vista de perfil del instrumento TARSIS, a la misma escala. En este caso se muestra el interfaz con el instrumento CARMENES. En ambos casos la luz proviene de la parte superior.

El tratamiento de los datos, desde que son producidos por el sistema de control del instrumento (responsabilidad del IAA-CSIC) hasta que son válidos por uso científico, requerirán de un delicado y complejo procesamiento (a nivel de las correcciones básicas de los efectos instrumentales introducidos) y de diferentes niveles de post-procesado, incluyendo la generación de cubos de datos, mosaicos, datos tipo *combo* de amplia cobertura espectral, catálogos de detecciones, espectros de fuentes individuales, mapas, etc. Esta ingente tarea, que se llevará a cabo dentro del contexto de la exploración CATARSIS (ver a continuación), constituye un paquete de trabajo (WP, del inglés *Work Package*) en sí mismo. Este WP incluye el desarrollo de:

- (1) El simulador del instrumento, que dará soporte al desarrollo de la cadena de procesamiento (ver más abajo) y a la planificación de CATARSIS y del que se derivará el Calculador de Tiempo de Exposición (ETC). Este sub-WP está liderado por el Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA).
- (2) La cadena de procesamiento de datos (DRP o *Data Reduction Pipeline*), a cargo de corregir los datos crudos de los efectos instrumentales a nivel de observaciones individuales. Este sub-WP está liderado por la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a través del Grupo UCM-GUAIX de Astrofísica Instrumental y eXtragaláctica.
- (3) Post-procesado, que a partir de la combinación de la información de los apuntados individuales generada por la DRP, los parámetros de ejecución de CATARSIS y la metrología de cada observación, deberá generar productos *science-ready* para su exploración posterior. Los distintos productos (cubos, catálogos, espectros extraídos) deberán minimizar la interpolación en el espacio de posiciones y longitud de onda. Este sub-WP está liderado por la UCM.
- (4) Control de calidad, tanto del resultado de la DRP como del post-procesado previamente descrito. Este sub-WP está liderado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC).
- (5) Como parte de un proceso iterativo, el software desarrollado como parte de (1), (2) y (3) será optimizado utilizando herramientas de *High-Performance Computing* (HPC). Este sub-WP está liderado por el Grupo de Supercomputación-Algoritmos de la Universidad de Almería.

- (6) Protocolos y servicios de almacenamiento y distribución al abrigo del Observatorio Virtual Español (SVO). Este sub-WP está liderado por el Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA).
- (7) Herramientas de software científico para la derivación de propiedades físicas de los objetos identificados (a partir de los datos extraídos al final del post-procesado y cuya calidad ha sido verificada) como parte de las observaciones de TARSIS y siempre dentro del contexto de la exploración CATARSIS. Este sub-WP está liderado por la Universidad de Granada (UGR).

Finalmente, el éxito del procesamiento y explotación de los datos del instrumento recae fuertemente en la disponibilidad de un gran número de calibraciones y una detallada caracterización del sitio en longitudes de onda en cierto modo inéditas para la instrumentación pasada del observatorio. Por tanto, desde el equipo del instrumento se está llevando a cabo un estudio dedicado del sitio en el rango más azul del espectro óptico, hasta 320 nm. Esta iniciativa, que constituye un WP de TARSIS en sí mismo, está liderada por la Universidad de Sevilla.

CATARSIS, LA CIENCIA

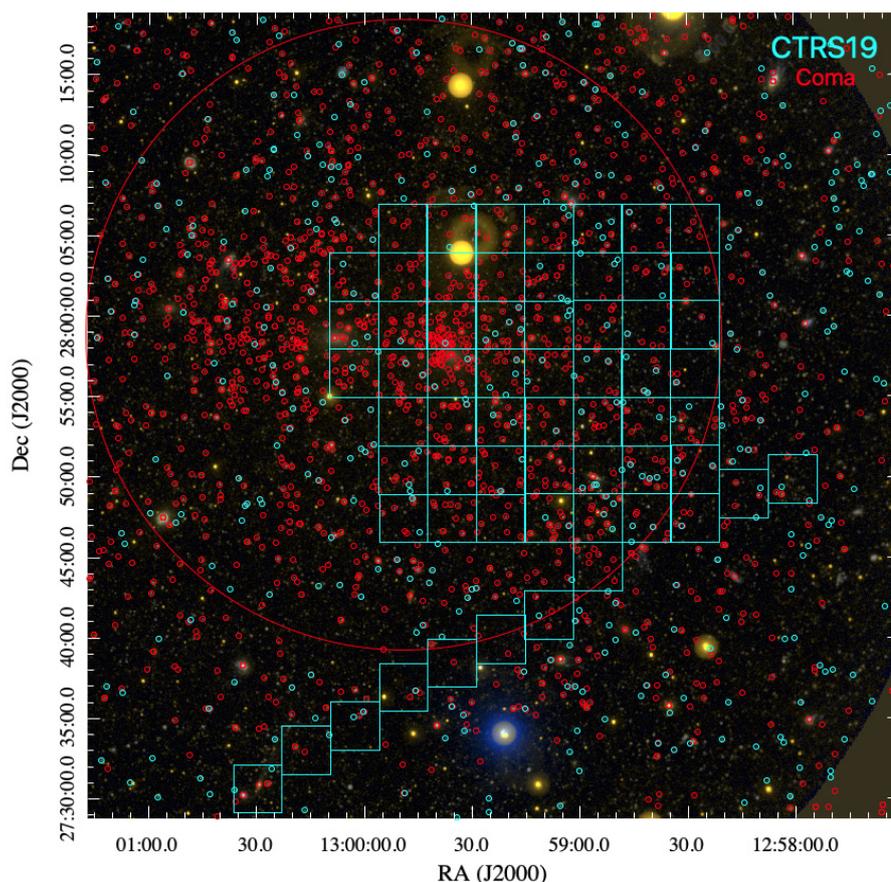
TARSIS ha sido diseñado para poder llevar a cabo CATARSIS, un cartografiado de 16 cúmulos de galaxias a desplazamientos al rojo entre $0,15 \leq z \leq 0,23$. Con 42,1 apuntados por cúmulo en media (ver ejemplo en la figura), se obtendrán espectros para todos los objetos de brillo superficial $\mu_r \approx 23,6 \text{ mag/arcsec}^2$ a una distancia de varias veces el radio virial del cúmulo y, en algunos casos, se mapearán los filamentos que los alimentan. Los cúmulos seleccionados tienen abundantes datos de archivo en sus partes centrales y todos ellos serán observados a 1,1 mm, 1,4 mm y 2 mm con la cámara ToITEC del Gran Telescopio Milimétrico (GTM), que obtendrá mapas de densidad del medio intra-cumular a través del efecto Sunyaev Zeldovich con resoluciones de 6".

Los objetivos de CATARSIS incluyen aspectos que van desde entender la naturaleza de la materia y la energía oscuras, determinar algunos de los parámetros cosmológicos o estudiar los errores sistemáticos en la medida de masas de los cúmulos que, hoy en día, representan la mayor fuente de incertidumbre en cosmología observacional. Así mismo,

las observaciones de CATARSIS servirán para conectar las propiedades de las galaxias con el entorno que las rodea teniendo en cuenta la historia reciente de ambos y, por lo tanto, su interacción. Las observaciones con TARSIS ofrecen dos grandes ventajas respecto a otros cartografiados de cúmulos de galaxias: (1) no es necesario seleccionar qué galaxias se van a observar, por lo que la muestra no estará sesgada en color o posición dentro del cúmulo. (2) El cubrimiento de la parte azul del espectro permitirá detectar la presencia de formación estelar residual hasta límites muy bajos, así como estudiar la evolución de la metalicidad o la función inicial de masas en estas galaxias.

CRECIMIENTO DE ESTRUCTURAS Y PARÁMETROS COSMOLÓGICOS

Las velocidades radiales en una muestra amplia y no sesgada de galaxias, cubriendo casi la totalidad del área proyectada del cúmulo, permitirán minimizar los errores sistemáticos en determinación de la distribución de masas en cúmulos con los métodos de la cáustica (Logan et al. 2022) y las lentes gravitacionales débiles gracias a la caracterización de la subestructura, la forma del cúmulo y a la disponibilidad de desplazamientos al rojo. La distribución de la masa en los cúmulos relajados es sensible al grado de interacción de la materia oscura (partes internas), y al ritmo de expansión del universo (partes externas), así como al



Mapeado previsto en el caso del cúmulo #19 de CATARSIS. Este cúmulo se encuentra situado a $z=0,158$ en las coordenadas aproximadas del cúmulo de Coma, que se encuentra a $z=0,023$. Dicho mapeado, que alcanza hasta radio virial en el caso de CTR19 cubre simultáneamente gran parte del cúmulo de Coma hasta su $R500$ (circunferencia roja). Las galaxias conocidas de CTR19 se marcan en color cian mientras que las galaxias pertenecientes a Coma están marcadas en rojo. El mosaico previsto con TARSIS se muestra en color cian, alcanzando el radio virial ($\sim R200$) del cúmulo CTR19, mientras que la circunferencia roja indica el radio $R500$ del cúmulo de Coma, mucho más cercano.

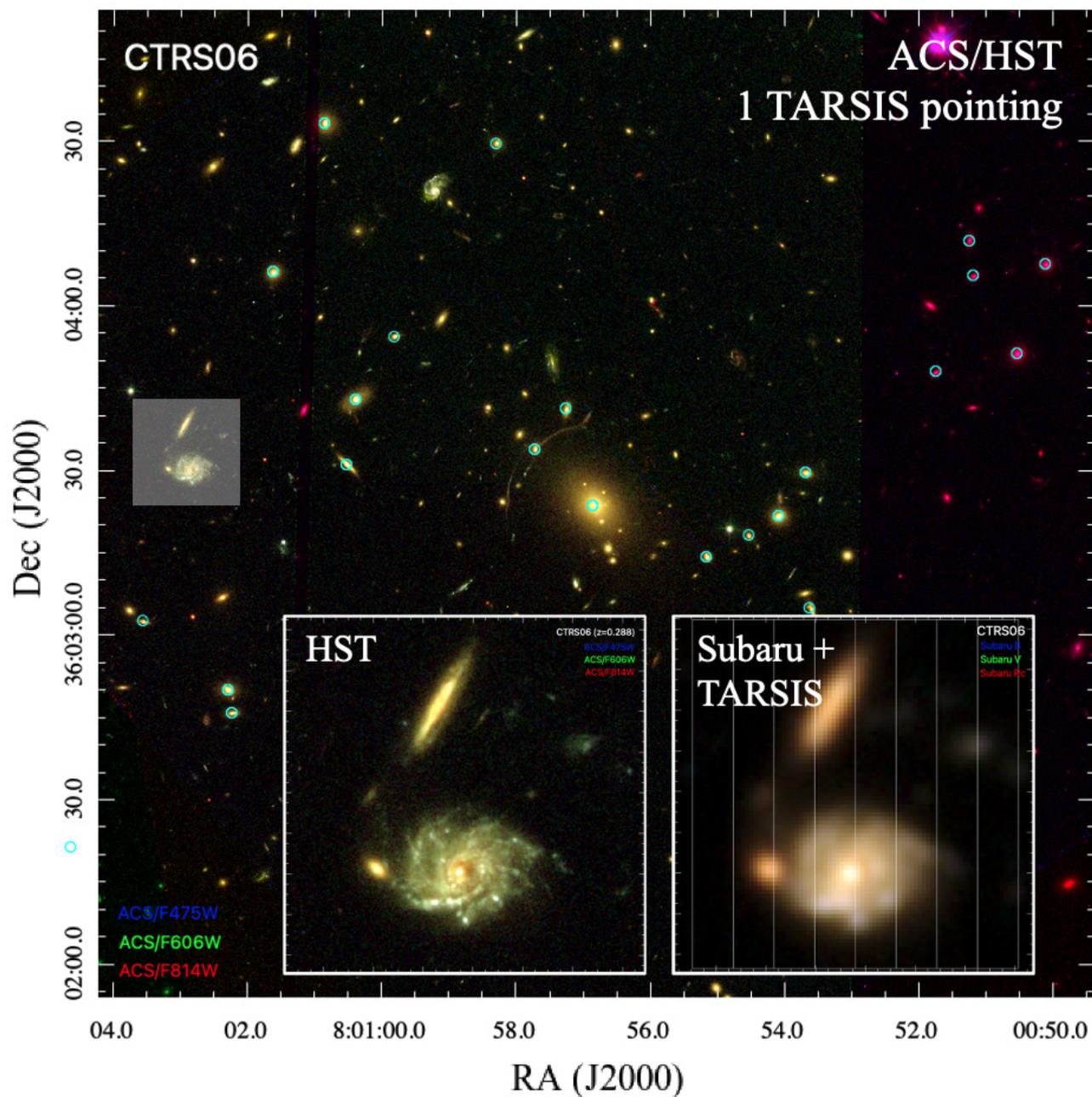


Imagen del telescopio espacial Hubble de la región central del cúmulo #6 de la muestra de CATARSIS, correspondiente a un único apuntado de TARSIS. Se identifican también los miembros previamente conocidos. Algunas de las características que se identifican en esta imagen se corresponden con galaxias de fondo amplificadas y distorsionadas por el efecto de lente gravitacional. En los detalles incluidos en la parte inferior se muestran dos de los objetos vistos por HST, por observaciones desde Tierra y con la resolución efectiva que proporcionarán los datos de CATARSIS.

espectro de fluctuaciones de densidad primordiales. La fracción de masa en subestructuras o el radio al cual la materia acreta alcanza el apocentro también permitirá estudiar el ritmo de crecimiento de estas estructuras.

PROCESOS FÍSICOS Y EVOLUCIÓN DE GALAXIAS EN UN ENTORNO DINÁMICO

CATARSIS también supondrá una mejora sustancial en los estudios de evolución de galaxias en distintos entornos. Hace más de tres décadas, Butcher y Oemler (1984) encontraron que la fracción de galaxias azules en cúmulos de galaxias era un 20% mayor a $z \sim 0,4$. Esta rápida evolución de los últimos 5.000 millones de años se interpretó como una evidencia de que las galaxias con formación estelar ingresan continuamente al entorno del cúmulo, donde diferentes procesos son capaces de convertirlas en sistemas que evolucionan pasivamente. Sin embargo, seguimos sin tener una idea clara acerca de los procesos que transforman las galaxias en los cúmulos o de cómo dependen estos del modelo cosmológico considerado.

El problema es debido, en parte, a la definición de entorno, que no incorpora aspectos esenciales para entender la complejidad de procesos que pueden afectar la evolución de una galaxia a su entrada a un cúmulo. Para poder entender estos procesos, es necesario conocer las órbitas de las galaxias dentro del cúmulo, la época de acreción, el estado dinámico del cúmulo, o las condiciones físicas del medio intracumular, que podremos determinar con CATARSIS.

Por otro lado, los distintos mecanismos que pueden transformar una galaxia dentro de un cúmulo actúan en escalas de tiempo que van desde 100 millones de años a 1 Giga-año. Sin embargo, los diagnósticos de tasa de formación estelar dependen de la fotoionización de estrellas masivas y, por lo tanto, reflejan actividad solo durante los últimos ~ 5 – 10 millones de años, después de lo cual la fotoionización disminuye rápidamente. Los estudios de poblaciones estelares en el rango óptico tampoco son capaces de distinguir si la formación estelar se truncó hace mil o cien millones de años si la masa de estrellas jóvenes representa un pequeño porcentaje de la masa total. Sin embargo, a longitudes de onda por debajo de ~ 300 nm, es posible detectar formación estelar residual que apenas represente un 1% en masa (Salvador-Rusiñol 2019). El rango espectral en reposo de

las galaxias en los cúmulos de CATARSIS a $z=0,15$ (278–704 nm) y $z=0,23$ (260–658 nm) permitirá, por lo tanto, caracterizar las escalas de tiempo en las que las galaxias se apagan en función de la época de entrada en el cúmulo, su pertenencia a subestructuras y las propiedades termodinámicas del gas.

Por último, el cartografiado de CATARSIS cubrirá un área de 1,7 grados cuadrados, por lo que no solo obtendrá espectros de galaxias en los cúmulos seleccionados, sino de muchos más objetos de fondo, a desplazamientos al rojo más altos. Gracias a su cubrimiento en el azul, CATARSIS obtendrá espectros de emisores de Ly α , [OII] y H α en un rango de desplazamientos al rojo ($1,6 < z < 2$) no accesibles con los espectrógrafos de campo integral actuales, pero que son de gran importancia porque se corresponden con la época en la que la densidad de formación estelar del universo alcanzó un máximo y empezó a declinar. Esto permitirá obtener funciones de luminosidad de emisores de Ly α a distancias y en rangos de luminosidad poco explorados y obtener, además, sus abundancias químicas y masa dinámicas. Muchos de los cúmulos actúan de lentes gravitacionales, por lo que podremos hacer estudios resueltos de muchas de estas galaxias (ver imagen). El número de cúmulos en los campos explorados permitirá la detección y caracterización del medio interestelar en absorción y será sensible a la emisión del medio circungaláctico a $z \sim 1,7$ – 2 , permitiendo estudios de los procesos de acreción de gas y de su abundancia química.

Aunque estos proyectos normalmente se llevan a cabo en telescopios de gran apertura, el gran campo de visión, el oscurecimiento cósmico mucho más pequeño y la eficiencia de TARSIS hacen que este proyecto sea altamente competitivo. Se estima un total de 12.000–15.000 espectros de objetos a alto desplazamiento al rojo al finalizar el cartografiado y la detección de galaxias con fuertes líneas de emisión podría llegar a triplicar este número.

PLANIFICACIÓN Y CALENDARIO DE TARSIS Y CATARSIS

Tras su integración en el Laboratorio de Instrumentación Científica Avanzada (LICA) de la UCM e instalación y puesta a punto en el telescopio, TARSIS dedicará la mayor parte de sus primeros años de funcionamiento a la observación de la muestra de cúmulos de galaxias objetivo de CATARSIS. Esta

muestra (que llamamos *Golden Sample*) consta de 16 cúmulos de galaxias y es parte de una muestra más amplia (que llamamos *Mother Sample*) de 33 cúmulos extraídos de diferentes compilaciones ya existentes: *RedMapper*, *SPIDERS*, *LOCUSS*, *Hetspec* y *CLASH*. Nuestras dos muestras cubren un amplio rango de propiedades de cúmulos tales como la masa, la riqueza y el estado evolutivo. Además, la mayor parte de los cúmulos de CATARSIS tienen datos complementarios disponibles obtenidos con otras instalaciones telescópicas, lo que proporcionará un análisis más rico de las propiedades de sus galaxias al combinarse con los datos de CATARSIS. Los cúmulos de CATARSIS se encuentran a desplazamientos al rojo en el intervalo $0,15 \leq z \leq 0,23$, lo que permitirá observar todas las líneas espectrales de interés, desde el doblete de MgII (situado en 320 nm en reposo) hasta H α (656 nm).

Los requerimientos científicos de CATARSIS imponen observar galaxias hasta magnitudes en continuo de $m_{AB,r} = 22$ mag y flujos de línea en emisión de $(1-2) \times 10^{-18}$ erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$. De esta forma se podrán observar no solo las grandes galaxias elípticas de los cúmulos, sino también espirales tardías, e incluso algunas galaxias enanas. Para conseguir observar nuestras galaxias con una relación señal a ruido que permita alcanzar los objetivos científicos de CATARSIS, hemos estimado un tiempo de exposición en cada posición del cielo de 8 horas en el rango azul, y de 2 horas 40 minutos en el rango rojo. Las observaciones de CATARSIS se llevarán a cabo durante noches o fracciones de noche oscuras y siempre a masas de aire inferiores a 1,22, que corresponde con elevaciones del telescopio superiores a ~ 55 grados. Este último detalle es crucial, dado que observar a estas elevaciones permite minimizar la extinción atmosférica, crítico para el rango espectral tan azul de TARSIS. Las coordenadas de los cúmulos de CATARSIS nos aseguran poder conseguir este objetivo, dado que cada uno de ellos es observable al menos 4,5 horas por noche a dichas masas de aire menores durante más de 3 meses al año.

Un detalle muy importante para las observaciones de CATARSIS es conocer la extinción del cielo de Calar Alto a longitudes de onda cercanas al ultravioleta. Para ello hemos comenzado una campaña de observación con el telescopio de 1,23m de Calar Alto, utilizando la cámara DLR (de 4096×4096

pixeles de 15 micras con $0,31''$ pix $^{-1}$) y un conjunto de filtros de anchura intermedia (10 nm) centrados en 320, 330, 340, 355, 365, 375 y 394 nm. Los resultados preliminares después de tres noches de observación en invierno de 2020-21, muestran que la extinción en Calar Alto a esas longitudes de onda es similar a la que se ha medido en otros observatorios de primera línea (Mauna Kea, Roque de los Muchachos, Kitt Peak, Paranal, entre otros). En particular, nuestras medidas arrojan una extinción en el cenit de 0,9 mag a 320 nm.

El diseño de TARSIS junto con el tiempo de exposición diferente requerido para cada apuntado en los rangos azul y rojo del espectro condicionan la estrategia observacional de CATARSIS. Cada posición del cielo se observará en 5 apuntados, con pequeños desplazamientos (dithering) entre sí de pocos segundos de arco, lo que permitirá cubrir los pequeños huecos entre los cuatro canales. Cada apuntado constará de cuatro exposiciones de 1920 segundos, con una rotación del campo de 90 grados entre exposición y exposición. De esta forma conseguiremos de forma homogénea el tiempo de exposición mencionado anteriormente para todos los cúmulos de CATARSIS tanto en el rango azul como en el rojo.

Para cubrir la muestra de cúmulos de CATARSIS hasta la profundidad requerida serán necesarios un total de 672 apuntados, lo que implica un total de 5392 horas de observación. Teniendo en cuenta que en Calar Alto se esperan unas 1500 horas nocturnas despejadas al año, según las estadísticas de los últimos 20 años, y que CATARSIS observará en noches total o parcialmente oscuras, el tiempo estimado para terminar CATARSIS es de unos 6 años. Así, las primeras observaciones de CATARSIS tendrán lugar a principios de 2027 y la primera liberación de datos (DR0) seis meses después. A partir de ahí, están previstas cuatro liberaciones de datos más, separadas por unos 12 meses. La última, DR4, se espera para finales de 2033.

El equipo de TARSIS y CATARSIS está compuesto por:

Investigadores Principales: Armando Gil de Paz (UCM), Jorge Iglesias Páramo (IAA-CSIC).

Científica a cargo de CATARSIS (Project Scientist o PS): Patricia Sánchez-Blázquez (UCM).

Representantes del consorcio de TARSIS: Esperanza Carrasco Licea (INAOE), Jesús Gallego Maestro (UCM), José M. Vílchez Medina (IAA-CSIC), José Oñorbe (US), Almudena Zurita (UGR), Ester Martín Garzón (UAL), Javier Piqueras López (CAB, CSIC-INTA), Marco Azzaro (CAHA), Marisa García Vargas (FRACTAL S.L.N.E.; también Gestora del Proyecto).

Equipo del instrumento TARSIS (no mencionados previamente): África Castillo-Morales (UCM), Sergio Pascual Ramírez (UCM), Ana Pérez Calpena (FRACTAL S.L.N.E.), Simon Tulloch (FRACTAL S.L.N.E.), Manuel Maldonado (FRACTAL S.L.N.E.), Ernesto Sánchez Blanco (FRACTAL S.L.N.E.), Gerardo Veredas (FRACTAL S.L.N.E.), Rafael Izazaga-Pérez (INAOE), Nicolás Cardiel López (UCM), Ainhoa Sánchez Penim (UCM), José Miguel Ibáñez Menguial (IAA-CSIC), Miguel Abril Martí (IAA-CSIC), Roberto Varas González (IAA-CSIC), Rocío Calvo Ortega (IAA-CSIC), Sergio Rodríguez Venzal (IAA-CSIC), Héctor Magán Madinabeitia (IAA-CSIC), David Pérez Medialdea (IAA-CSIC), Isabel Bustamante Díaz (IAA-CSIC), Emilio J. García Gómez-Caro (IAA-CSIC), Celia Navas Martín (IAA-CSIC), Jesús Aceituno (CAHA), Vicente González Ruiz (UAL), Enrique de Guindos (CAHA), Luis Hernández (CAHA), Santiago Reinhart (CAHA), Daniel Benítez (CAHA), Jens Helmling (CAHA), David Maroto (CAHA), Vicente Gómez (CAHA), Jaime Zamorano (UCM), Beatriz Callejas Córdoba (UCM), Francisco Miguel Montenegro Montes (UCM), María Peñataro Blanco (FRACTAL S.L.N.E.), Miguel Arroyo (INAOE), Magda Hernández (INAOE), Valentín López (INAOE), Jorge Reyes (INAOE), Yaritza Borroel (INAOE), José Antonio Martínez García (UAL), Juan José Moreno Riado (UAL), Mónica Relañó (UGR).

Miembros del equipo (científico) de CATARSIS:

Responsables científicos adjuntos: Alfredo Montaña (INAOE), Carolina Kehrig (IAA-CSIC) y José Oñorbe (US).

Equipo científico: CATARSIS: Yago Ascasibar (UAM), Nicolás Cardiel (UCM), Esperanza Carrasco (INAOE), África Castillo Morales (UCM), Salvador Duarte (IAA-CSIC), Anna Ferré-Mateu (IAC), Estrella Florido (UGR), Lluís Galbany (UAB), Jesús Gallego (UCM), Marisa García Vargas (FRACTAL S.L.N.E.), Armando Gil de Paz (UCM), Mariángeles Gómez-Flechoso (UCM), Javier Gorgas (UCM), Jorge Iglesias Páramo (IAA-CSIC), Yolanda Jiménez Teja (IAA-CSIC), Álvaro Labiano (ESAC), Adriana de Lorenzo Caceres (IAC-CSIC), Miguel Mas-Hesse (CAB, CSIC-INTA), Divakara Mayya (INAOE), Jairo Méndez-Abreu (IAC), Raúl Mújica (INAOE), Emma de Oña Wilhelmi (DESY), Sergio Pascual (UCM), Isabel Pérez (UGR), Pablo G. Pérez-González (CAB, CSIC-INTA), Enrique Pérez-Montero (IAA-CSIC), Javier Piqueras López (CAB, CSIC-INTA), Santi Roca-Fàbrega (UNAM), Daniel Rosa-González (INAOE), Sebastián Sánchez (UNAM), David Sobral (U. Lancaster), Elena Terlevich (INAOE), Roberto Terlevich (INAOE), José R. Valdés (INAOE), Alexandre Vazdekis (IAC-CSIC), José Manuel Vílchez (IAA-CSIC), Eva Villaver (CAB, CSIC-INTA), Jaime Zamorano (UCM), Almudena Zurita (UGR). La Galaxia y el Grupo Local: Miriam García (CAB, CSIC-INTA), Martín Guerrero (IAA-CSIC), Artemio Herrero (IAC-CSIC), Jesús Maíz Apellániz (CAB, CSIC-INTA). Sistema solar: Álvaro Álvarez-Candal (U. Alicante), René Duffard (IAA-CSIC). Transitorios y objetos de oportunidad: Alberto Carramiñana (INAOE).

El equipo de TARSIS quiere agradecer al Observatorio de Calar Alto y al MCIN por la financiación requerida para poder completar este proyecto en fecha y en requerimientos.



En la última asamblea de la SEA, la Comisión Proam presentó el informe de situación Proam 2021. Se trata de un informe que trata de radiografiar cuáles son las características que definen la colaboración entre profesionales y amaters en el ámbito de la astronomía. Entre sus objetivos están evaluar la situación en la que se encuentra este tipo de colaboración y recoger sugerencias y aportaciones que nos permitan mejorar las dinámicas entre ambos colectivos.



Iñaki Ordóñez Etxeberria
inakioe@gmail.com
Planetario de Pamplona

Ana Guijarro Román
guijarro@caha.es
Observatorio Astronómico de Calar Alto

Miriam Cortés Contreras
mcortes@cab.inta-csic.es
Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)

Enrique Diez Alonso
diezenrique@uniovi.es
Instituto de Ciencias
y Tecnologías Espaciales de Asturias

En los últimos años las investigaciones realizadas en el campo de la Astronomía y de la Astrofísica por institutos, universidades y centros de investigación, han experimentado un notable incremento de aportaciones realizadas por colaboradores procedentes del campo amater. De hecho, en algunos casos dichas investigaciones no podrían llevarse a cabo dado el elevado número de horas de observación necesarias, solo al alcance de colaboradores amaters avanzados con instrumental propio.

Con el fin de optimizar y potenciar dicha colaboración Proam, es necesario responder a ciertas cuestiones que hasta la fecha no han sido planteadas: ¿cuánta gente amater participa activamente en proyectos Proam?, ¿cuántos no lo hacen aun sabiendo de dichos proyectos? ¿qué razones tiene para ello? ¿cuántos profesionales fomentan estas colaboraciones y hacen uso de los datos obtenidos en ellas?, ¿cuántos no lo hacen y porqué?, ¿cuáles son los campos de la astronomía que más se ven favorecidos por la participación Proam?, ¿cuáles son las carencias que tienen este tipo de colaboraciones?, ¿y sus fortalezas?, ¿qué tan importante es esta colaboración dentro de todo el avance en el campo de la astronomía que se desarrolla en nuestro país?, ¿cómo se compara con colaboraciones similares en otros países?

Estas preguntas no tenían respuesta, o al menos no tenían un primer esbozo de respuesta hasta la fecha. Con el informe de 'Situación Proam en España', que desde la Comisión Proam de la SEA hemos presentado recientemente, la situación ha cambiado ya que en el mismo se arroja luz sobre algunas de estas cuestiones por vez primera.

¿CUÁLES HAN SIDO NUESTRAS FUENTES DE DATOS?

Para analizar y evaluar la situación de esta colaboración, decidimos explorar diferentes vías para obtener las respuestas a las cuestiones expuestas anteriormente. En los últimos meses, hemos recopilado datos procedentes de los Congresos Proam celebrados hasta la fecha, y se han recopilado numerosas publicaciones científicas realizadas con la participación de observadores amaters. Además de estas fuentes de información, en abril de 2021 se publicó la encuesta 'Estudio de la colaboración Proam en astronomía' que conforma gran parte de lo expuesto en el informe. La encuesta propuesta por la Comisión Proam de



Informe 2021 situación Proam en España



Comisión Proam Sociedad Española de Astronomía

Iñaki Ordóñez-Etxebarria (Planetario de Pamplona),
Ana Guijarro Román (CAHA),
Ángel Rafael López Sánchez (Macquarie University),
Enrique Díez Alonso (ICTEA),
Itziar Garate López (UPV/EHU),
Joaquín Álvaro Contreras (FAAE Federación de Asociaciones Astronómicas de España),
Miriam Cortés Contreras (Centro de Astrobiología [CSIC-INTA]),
Salvador Ribas (PAM/UB)

Portada del informe.

la SEA se diseñó para ser respondida por personas pertenecientes a los dos ámbitos protagonistas de esta colaboración: el profesional y el amater. Se distribuyó a través de la Sociedad Española de Astronomía y la Federación de Asociaciones Astronómicas de España, y el cuestionario fue respondido por cerca de 150 personas hasta diciembre de 2021.

Estas respuestas y comentarios nos han aportado una valiosa información, suficiente para realizar el primer informe de 'Situación Proam en España' y para obtener cierta perspectiva del alcance y situación actual de la colaboración Proam en nuestro país.

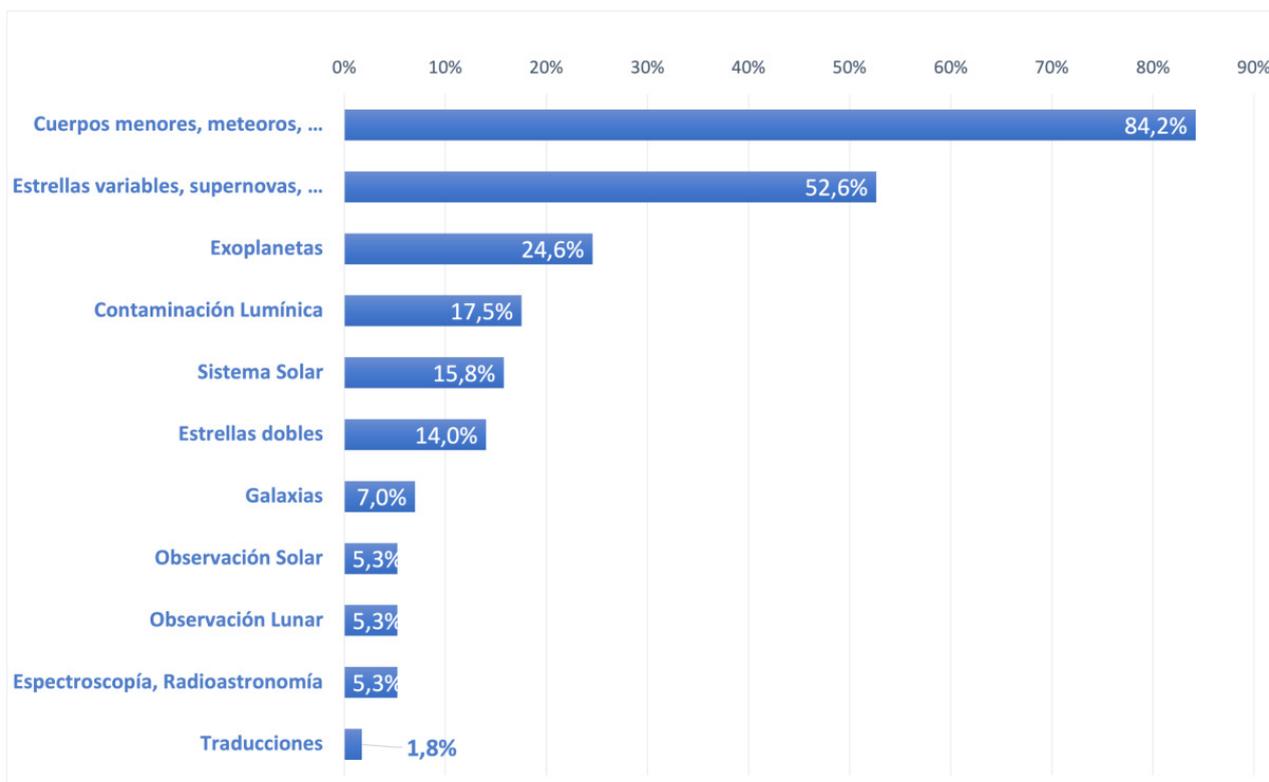
El informe se estructura en tres bloques destacados; Por un lado, se exponen las respuestas y comentarios recibidos por el colectivo amater. Por otro, se recogen las aportaciones procedentes del ámbito

profesional, y finalmente se recopilan y agrupan los comentarios y sugerencias que se recibieron en la encuesta. Además se incluye una síntesis cuantitativa de las aportaciones de la colaboración Proam en forma de publicaciones científicas.

PRINCIPALES CONCLUSIONES

El colectivo amater en nuestro país es muy numeroso, y de éste una parte colabora de manera activa con la comunidad profesional en proyectos científicos, resultando estas colaboraciones en producción científica a través de publicaciones. Esta es una de las principales conclusiones obtenidas con la encuesta y los datos recopilados de los distintos congresos Proam.

A pesar de que el número de participantes de la encuesta no fue muy extenso si se compara con el número de personas federadas en la FAAE (unas 7500) y asociadas a la SEA (854, marzo



Temáticas en las que se colabora desde el ámbito amater.

2022), con la participación en el cuestionario sí podemos extraer conclusiones valiosas por la relevancia de las respuestas. Además de que el objetivo de la encuesta era que fuera respondida por aquellas personas que participan activamente en proyectos de colaboración Proam, de forma que se pudieran extraer conclusiones como carencias, fortalezas y mejoras de la propia colaboración.

De manera cuantitativa, estaríamos hablando de alrededor de 100 amaters cuyo trabajo observacional se ve plasmado en más de 200 artículos científicos y unas 4800 circulares astronómicas y comunicaciones en congresos. Además, se han censado 20 grupos amaters articulados en torno a proyectos de colaboración Proam y especializados en determinadas áreas de la astronomía.

Es sorprendente descubrir que una parte importante de amaters españoles participan en proyectos Proam fuera de nuestras fronteras, y que profesionales españoles colaboran principalmente con amaters no nacionales. Se advierte, por tanto, cierta falta de coordinación en la colaboración nacional que podría relacionarse con la demanda de información por parte del ámbito amater relativa a los proyectos profesionales españoles susceptibles de requerir colaboración Proam.

Algunos ámbitos relevantes en la colaboración Proam son el estudio de cuerpos menores del Sistema Solar (asteroides, cometas, meteoros, meteoritos, ...) y las estrellas variables. El éxito de estos campos podría explicarse gracias a la accesibilidad de las técnicas de observación por parte del ámbito amater.

De la encuesta extraemos un dato preocupante que es la clara diferencia de género. Las mujeres que colaboran en el ámbito amater son el 7%, y se reducen a tan solo el 4% para las colaboradoras profesionales. Estos datos tan bajos no se pueden justificar con el número de astrónomas profesionales y amaters que hay en general, porque estas suponen un 28% y un 24%, respectivamente. Es necesario articular medidas que reduzcan la diferencia reflejada gracias a estos números.

PASOS DADOS

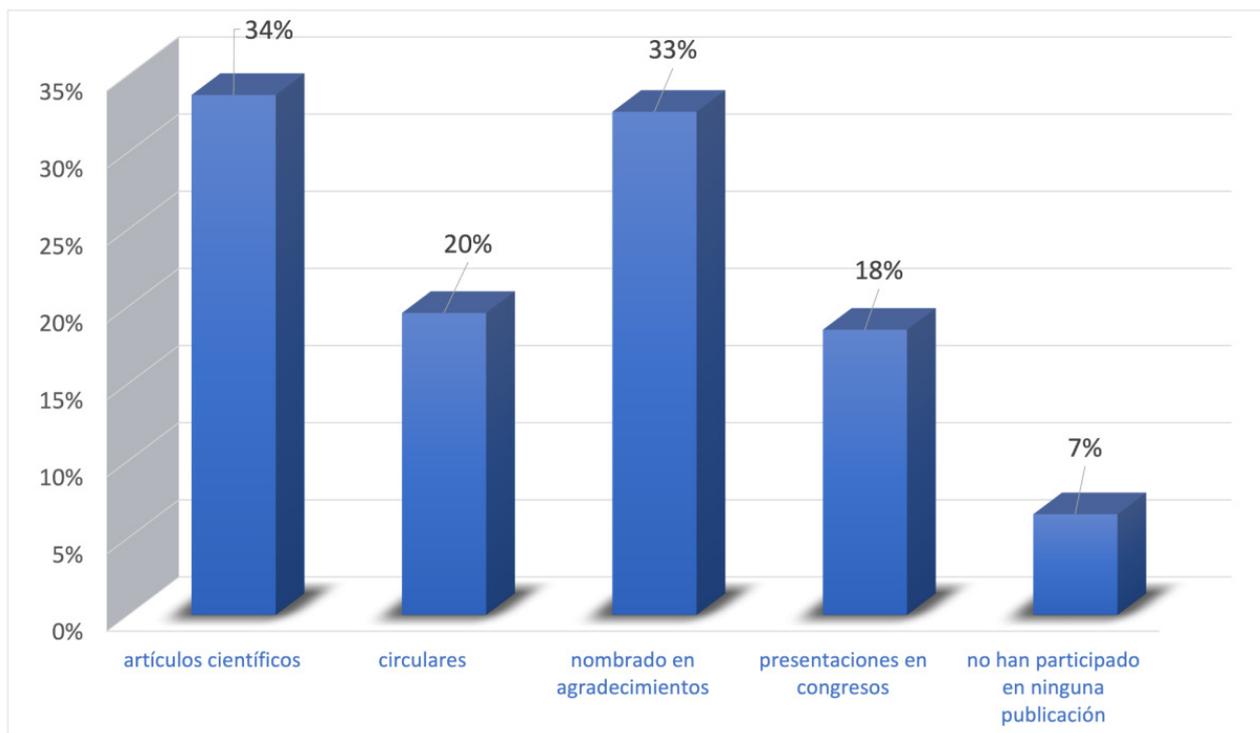
A raíz de las conclusiones obtenidas en el análisis de la información obtenida y la elaboración de este informe, en la comisión Proam de la SEA se ha comenzado a trabajar en diferentes aspectos de cara a mejorar las dinámicas entre los ámbitos amater y profesional, así como para dar respuesta a algunas de las sugerencias apuntadas en el informe.

En este sentido, hemos creado una página web dedicada exclusivamente a la colaboración Proam en España (<https://proam.sea-astronomia.es/>). Es un portal coordinado conjuntamente por la Comisión Proam de la SEA y la FAAE, donde encontrar información sobre congresos y sesiones, premios, formación, recursos para profesionales y amaters...

Además, desde finales de 2021, estamos organizando sesiones divulgativas mensuales (el último jueves de cada mes) con el objetivo de dar mayor visibilidad a la colaboración Proam en nuestro país. Es un espacio donde se conocen experiencias interesantes, motivadoras y originales, tanto de profesionales como de amaters y del que esperamos que surjan nuevas colaboraciones. Además dichas sesiones quedan disponibles online en la plataforma YouTube, de manera que puedan ser visionadas en cualquier momento por quien lo desee.

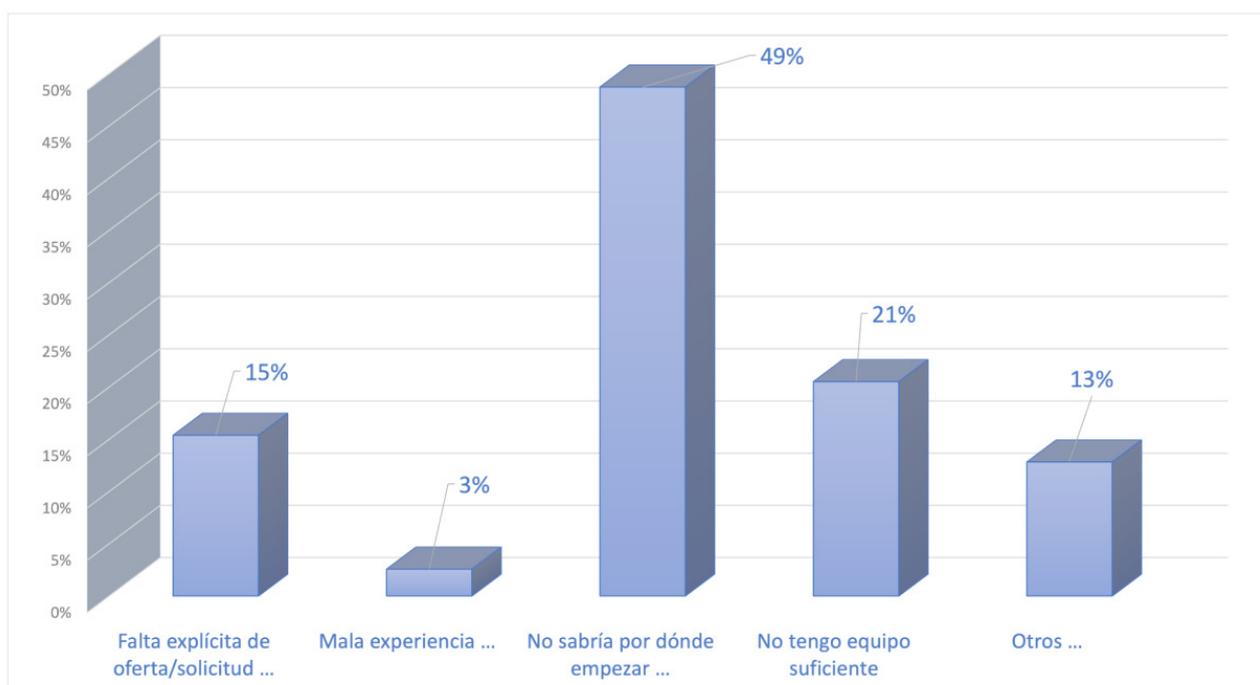
Respondiendo a la demanda de formación, hemos comenzado a coordinar cursos específicos como el "Curso de Python para astrónomos aficionados... ¡o no!" impartido por Sergio Alonso y Javier Flores de la Universidad de Granada y el "Curso de cálculo astronómico" impartido por Enrique Velasco de la Universidad Autónoma de Madrid, actividades en las que el número de solicitudes de inscripción ha superado todas las expectativas. Del mismo modo que las sesiones divulgativas, los contenidos de estos cursos están abiertos al público general en la plataforma YouTube y suponen una valiosa herramienta de aprendizaje.

Por último, hemos definido un código de buena conducta de aplicación en las colaboraciones y relaciones Proam en astronomía (<https://proam.sea-astronomia.es/index.php/alertas/64-codigo-de-buena-conducta>), donde se sugieren "normas" y buenas prácticas a seguir para garantizar el bienestar de todas las personas que participan en proyectos Proam.



Tipos de publicaciones en los que el colectivo amater ha visto plasmada su colaboración.

Causas de no colaboración entre los amaters interesados en proyectos Proam.



ACCESO AL DOCUMENTO

El informe se puede consultar desde la nueva web que la comisión ha creado para facilitar la comunicación entre amateurs y profesionales: <https://proam.sea-astronomia.es/>. En esa dirección está el acceso al documento de 40 páginas en el que se puede encontrar los detalles de los datos recopilados en su elaboración. Un documento que resultará de interés para aquellas personas que participan en proyectos de colaboración proam.

INFORME 2023

Aunque desde la Comisión Proam de la SEA acabamos de presentar el informe con datos recopilados en 2021, ya estamos trabajando en el desarrollo del estudio en el que se plasme la situación de la colaboración proam en el 2023. Nuestra intención es recopilar nuevas publicaciones científicas que hayan sido resultado de esta colaboración, identificar nuevas colaboraciones tanto de profesionales como de amateurs y realizar una nueva encuesta a principios del próximo año. Todo con el objetivo de determinar la situación de la colaboración proam en nuestro país, y valorar las posibles evoluciones que se hayan dado en los dos últimos años.

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.

NANDA REA, PREMIADA POR CIENCIA EN ACCIÓN

La astrónoma Nanda Rea (ICE-CSIC, IEEC) ha recibido el primer premio ex-aequo de cortos científicos en la XXIII edición del concurso Ciencia en Acción 2022 con el cortometraje "Púlsares: un cuento sobre relojes cósmicos". El premio fue otorgado "por mostrar con técnicas cinematográficas a jóvenes estudiantes que la ciencia no tiene género y por dar visibilidad a la contribución de Jocelyn Bell a la astrofísica". ¡Enhorabuena, Nanda!

DOS PREMIOS PRISMAS 2022 PARA MIEMBROS DEL IAA

Enrique Pérez Montero (IAA-CSIC) obtuvo el Premio Especial del Jurado 2022 del Premio Prismas por su labor de divulgación y acercamiento de la ciencia a personas que, como él, padecen una discapacidad visual. Además, el premio al mejor trabajo en vídeo recayó sobre la webserie musical del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) "Camino a Congreso", proyecto gestado y dirigido por Manuel González y Emilio García. Un congreso en un inhóspito pueblo de Almería, llamado Congreso, marca el comienzo de esta road movie en la que la ficción se entremezcla con la astrofísica, la antropología, la neurobiología, la energía solar o las dificultades de la carrera investigadora, y en la que, en algún momento de cada capítulo, alguien se arranca a cantar. ¡Enhorabuena a todos!

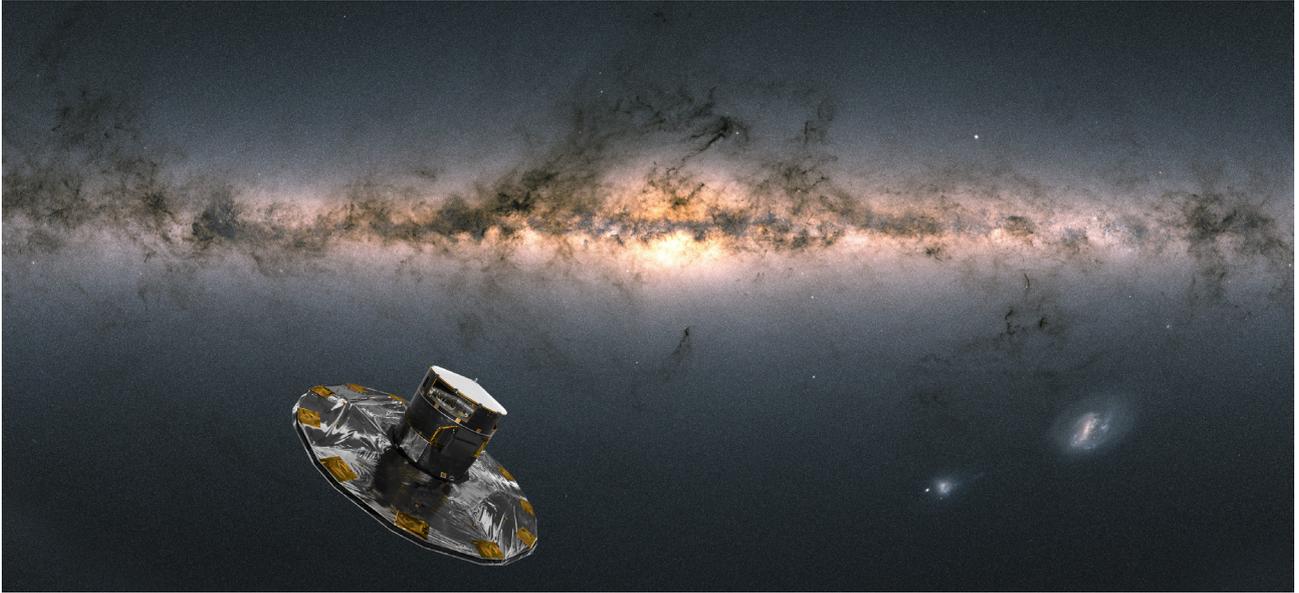
JAVIER PERALTA GANA EL II PREMIO JAVIER GOROSABEL

Durante la XV Reunión Científica de la SEA se hizo entrega del II Premio Javier Gorosabel de colaboración ProAm a Javier Peralta, (Universidad de Sevilla), junto con Emmanuel Kardasis (Sociedad Helénica de Astrónomos Aficionados) por un trabajo titulado "Astrónomos 'a la caza' de la discontinuidad de Venus".

El objetivo de este premio es dar a conocer y reconocer la colaboración entre profesionales y amateurs en la astronomía de nuestro país. Además rinde homenaje a nuestro querido compañero y gran científico Javier Gorosabel Urkia (1969-2015), que tanto hizo por esta colaboración. ¡Felicidades a Javier y Emmanuel!

AMELIA ORTIZ, PREMIO JOSÉ M^a SAVIRÓN DE DIVULGACIÓN

Amelia Ortiz (Observatorio Astronómico - Universidad de Valencia) ha sido la ganadora de la X edición del Premio José M^a Savirón de divulgación científica en la categoría 'Premio a la Trayectoria en Divulgación' por "su prestigiosa y consolidada trayectoria en el ámbito de la divulgación científica" y la "calidad y originalidad de sus actividades, que han tenido un claro impacto social e inspirador en nuevas generaciones sobre la belleza e importancia de la ciencia".



La Colaboración GAIA, entre los galardonados

JOSÉ CERNICHARO RECIBE EL PREMIO BLAS CABRERA

El premio Blas Cabrera, en el área de ciencias físicas, de los materiales y de la tierra de 2022 ha sido otorgado a José Cernicharo (Instituto de Física Fundamental del CSIC) por su trabajo pionero mundial en la astrofísica molecular, y por sus aportaciones multidisciplinares de gran impacto en los ámbitos de las ciencias físicas, químicas y de materiales. ¡Muchas felicidades, Pepe!

NUEVOS MIEMBROS DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

Recientemente, cuatro profesionales de la astronomía han sido nombrados miembros de la RAC, Almudena Alonso Herrero (Centro de Astrobiología), Xavier Barcons (European Southern Observatory) y Jorge Peñarubia (Royal Observatory of Edinburgh), miembros de la SEA, y Juan García Bellido (Instituto de Física Teórica/Universidad Autónoma de Madrid). ¡Enhorabuena!

HASTA SIEMPRE, LA LAGUNA. GRANADA, NOS VEMOS EN 2024

Después de la fantástica XV reunión científica de la SEA en la Laguna, que nos ha permitido volver a vernos de forma presencial, la Junta de nuestra sociedad y el IAA van calentando motores para acogernos en la maravillosa ciudad de Granada con motivo de la XVI reunión científica, que se celebrará en 2024. ¡Muy aconsejable ver antes la webserie "Camino a Congreso" del propio IAA!

LA COLABORACIÓN GAIA, PREMIO LANCELOT M. BERKELEY

La colaboración Gaia ha recibido el premio Lancelot M. Berkeley – New York Community Trust Prize que reconoce "el trabajo altamente meritorio en el avance de la ciencia de la astronomía". ¡Enhorabuena especialmente a los/las miembros del equipo de Gaia de nuestra sociedad!

RENOVACIÓN DE LA JUNTA DE LA SEA

A partir del 1 de enero de 2023 se renovará la Junta de nuestra Sociedad con tres nuevos miembros: Alberto Manrique Oliva (UB) (vocalía), Olga Muñoz Gómez (IAA-CSIC) (secretaría), Luisa Valdivielso Casas (CE-FCA) (vocalía). Tras cuatro años de servicio en la Junta, dejan sus puestos Santiago Pérez Hoyos (UPV/EHU) (vocalía), Miguel Ángel Pérez Torres (IAA-CSIC) (secretaría) y Amelia Ortiz Gil (Observatori Astronòmic – UV) (vocalía). ¡Los mejores deseos para esta nueva Junta!

GUILLERMO BERNABÉU, DESCANSE EN PAZ

Con mucha tristeza, hemos despedido recientemente a nuestro compañero Guillermo Bernabéu Pastor, un "apasionado de la astronomía" que llevó esta ciencia hasta el mismísimo Congreso durante su etapa de diputado. Fue uno de los impulsores de la astronomía en España, tanto a nivel profesional en la Universidad de Alicante, como en el educativo, por ejemplo, participando de forma entusiasta en numerosas ediciones de Ciencia en Acción. Descanse en paz.

LA TIERRA EN PELIGRO

Josep M. Trigo Rodríguez

ISBN: 978-84-9168-787-0

ISBN: 978-84-9168-788-7 (en catalán)

Editorial Universitat de Barcelona

Un asteroide gigante pasará mañana cerca de la Tierra. Este es uno de los titulares recurrentes que la prensa suele ofrecernos. El catastrofismo vende y el posible fin de la civilización tal como la conocemos es tema de películas apocalípticas que entretienen al personal. Sin embargo con esta actitud se banaliza un problema real que tiene como consecuencia que el peligro que viene del cielo no ocupe todo el espacio mediático que se merece.

Los planetas del sistema solar se formaron por la agregación lenta de planetesimales pero también por los choques violentos de asteroides en la llamada época del gran bombardeo. La mayoría de este material ya ha sido eliminado, pero nuevos impactores continúan rellenando el espacio interplanetario de rocas y polvo, resultado directo de choques más recientes entre asteroides, cometas e incluso planetas.

Algunas de estas rocas encuentran nuestro planeta en su camino y, dependiendo de su tamaño y velocidad, pueden llegar a ser un problema real para la humanidad. A lo largo de la historia de la Tierra numerosos asteroides pequeños y meteoroides han penetrado en la atmósfera terrestre y causado cambios globales, regionales o locales. La mayoría de veces, sin embargo, son rocas pequeñas que vienen del espacio y que se fracturan totalmente por la fricción con la atmósfera, un buen escudo natural para cuerpos menores de 100 m. En todos los casos podemos estudiar estos eventos cósmicos a través de los restos que llegan a la superficie de la Tierra: los meteoritos.

Los meteoritos permiten abordar cuestiones clave sobre los procesos fisicoquímicos que se han producido desde los orígenes del sistema solar en los cuerpos de origen. El 85% son condritas y provienen de cuerpos de pocos centenares de kilómetros de diámetro, sin diferenciación química. Contienen, por tanto, residuos del disco protoplanetario primigenio. El resto, acondritas, metalorocosos y metálicos provienen de cuerpos diferenciados mayores y de planetas.

Con el estudio de estos restos no solo conocemos el origen y el pasado del sistema solar, también aprendemos sobre el presente y el futuro de la Tierra. Las interacciones y resonancias gravitatorias llevan a algunos asteroides y cometas a cruzar la órbita terrestre. Son los llamados NEO (Near Earth Objects), objetos cuya trayectoria se acerca a nuestro planeta y podrían impactar.

Si bien la mayoría de los NEO ya están catalogados y con sus órbitas bien determinadas, los menores de 100 metros de diámetro son poco conocidos. Sin embargo, el mayor problema es la detección de los cometas viejos que han perdido sus componentes volá-



Josep M. Trigo Rodríguez

La Tierra en peligro**El impacto de asteroides y cometas**

tiles y solo presentan un núcleo rocoso. Estos objetos oscuros, con órbitas muy excéntricas y alta velocidad, quedan escondidos y son potencialmente peligrosos.

La exploración del entorno próximo a la Tierra, la caracterización de los objetos que se allí se encuentran y de los que llegan a la Tierra es actualmente una disciplina científica interdisciplinar en auge en la que intervienen la astronomía, la astronáutica, la geología y la ingeniería.

Josep Maria Trigo en su libro *La Tierra en peligro* nos ofrece la investigación puntera que su grupo realiza en múltiples facetas, desde la caracterización de los meteoritos, su órbita, su progenitor, las características del medio interplanetario, el estudio de las muestras de asteroides y la colaboración en las primeras pruebas de defensa planetaria.

No olvidemos que la Tierra ha sido atacada desde el espacio a lo largo de toda su historia geológica como lo demuestra el cráter Chicxulub o el estallido atmosférico reciente de Cheliábinsk. Para aumentar la conciencia pública sobre el peligro de impacto de los asteroides, cada 30 de junio se celebra el día del Asteroide, aniversario del evento de Tunguska.

La primera acción de defensa planetaria ha sido la reciente misión DART. Los ingenieros espaciales acaban de demostrar que son capaces de cambiar el movimiento de un asteroide. Un preludio del futuro programa de defensa planetaria que deberá proteger la civilización humana de los peligros del espacio. De los peligros terrestres que causamos nosotros, como es el cambio climático, ya lo hablaremos otro día.

Enric Marco

Departament d'Astronomia i Astrofísica
Universitat de València

MIDIENDO EL CIELO Y LA TIERRA.

Fernando J. Ballesteros

ISBN: 978-84-1361-137-2

Editorial Shackleton Books

Midiendo el cielo y la Tierra es una mezcla muy interesante entre la historia y la ciencia, que nos acerca a hitos históricos en el conocimiento de la Tierra y el Universo de una forma amena. Pone en primer plano el ingenio humano, de la mano del desarrollo instrumental, para hacer posible el avance de la ciencia. Y además, nos trae “de regreso a la Tierra”. Desde la Antigüedad, entendieron que para poder empezar a dibujar los primeros trazos del conocimiento del cielo, debían primero entender su sistema de referencia, la Tierra.

Desde las primeras páginas, el autor nos sumerge en el contexto histórico de las primeras medidas del tamaño y forma de la Tierra, y nos va detallando los métodos de medición al principio muy rudimentarios, pero que van cobrando complejidad con el paso del tiempo. En estos días en los que hemos llegado a un desarrollo impensable en los tiempos de Eratóstenes, cuando tenemos satélites y podemos acceder a medidas con una precisión exquisita, no está mal volver la vista atrás y ver que incluso usando burdas aproximaciones y el sentido común, podemos llegar a conclusiones importantes.

En el libro se entrelazan historias, diálogos en los que los personajes nos transmiten no sólo los conceptos científicos de una forma divertida para el lector, sino que va más allá haciéndonos llegar la idiosincrasia de la época. Personalmente, he disfrutado mucho de la conversación entre un joven estudiante Kepler y su mentor Tycho Brahe. Tendemos a pensar en estos grandes científicos ya consolidados, pero no como aquellos estudiantes con ideas revolucionarias para la época. Me atrevería a decir que el hilo conductor del libro, más allá de la discusión científica y el desarrollo tecnológico, tiene un carácter humano fundamental. Me viene a la cabeza, la frase “el estudiante supera al maestro”, y es que sin duda esa es la base de la ciencia. El estudiante con ayuda de su mentor parte de una base de conocimiento que su mentor no tenía, sin obviar el desarrollo instrumental y el acceso a nuevos datos. Y así vamos avanzando... Me fascina el recorrido que el autor hace en este libro desde el uso de una simple sombra, hasta desarrollos mucho más complejos. Todo esto manteniendo la atención del lector, sin caer en aburridos tecnicismos para el lector general.

Después de la situación vivida debido a la pandemia de COVID-19, ahora podemos entender mejor que nunca algunos momentos históricos que tuvieron una repercusión directa en el desarrollo

Fernando J. Ballesteros

Midiendo el cielo y la Tierra

La aventura de medir el cosmos, de Eratóstenes a la paralaje estelar



Shackleton
— books —

de la ciencia. Según comenta el autor, aunque el cambio en la forma de hacer ciencia llega con el Renacimiento en el siglo XV, ya en el siglo XII había surgido un nuevo interés por la ciencia. Esto se materializó en el incremento de la actividad intelectual y científica tanto en ámbitos religiosos como en la fundación de las primeras universidades europeas. Sin embargo, la peste negra supuso un revés a este florecimiento, lastrando el desarrollo científico de la época.

He de decir que este libro, además de hacerme disfrutar con su lectura, me ha dado también herramientas para poder refutar, de forma fácil y sencilla, ideas absurdas de café sobre la forma de la Tierra u otras similares. Todo esto sin verme obligada a sacar toda la munición técnica, sin más que hacer un par de dibujos en una servilleta. Estoy deseando llegar a la próxima discusión con este libro bajo el brazo, es posible que disfrute aun más la puesta en práctica de estas ideas que la propia lectura del libro (¡que no ha sido poca!).

Pepa Becerra González
Instituto de Astrofísica de Canarias
Universidad de La Laguna

Agrupamiento de galaxias con el *Dark Energy Survey*: medida y mitigación de sistemáticos

Autor: Martín Rodríguez Monroy

Tesis doctoral dirigida por: Eusebio Sánchez Álvaro e Ignacio Sevilla Noarbe

Centro: Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)

Fecha de lectura: 10 de noviembre de 2021

Esta tesis se ha desarrollado dentro del *Dark Energy Survey* (DES), una colaboración internacional que busca entender la naturaleza de la energía oscura. DES ha tomado datos durante seis años, observando 691M de objetos desde el Telescopio Víctor Blanco de 4 m en Cerro Tololo, Chile. Ha observado 5000 deg², en cinco bandas fotométricas anchas en el rango óptico grizY. Las imágenes se tomaron con el instrumento DECam. Los datos correspondientes a los tres primeros años de observaciones (Y3) contienen información sobre 399M de objetos. Con estos datos se generan las dos muestras de galaxias lente empleadas durante el análisis de DES-Y3: MagLim, una muestra limitada en magnitud y optimizada para maximizar el poder de determinación de los parámetros cosmológicos que contiene ~11M de galaxias, y redMaGiC, una selección de ~3M de galaxias rojas luminosas con desplazamientos al rojo fotométricos de alta calidad. Este trabajo se ha llevado a cabo como parte del proyecto de medición del agrupamiento de galaxias y de mitigación de sistemáticos observacionales en los datos DES-Y3 y representa una aportación esencial para las medidas cosmológicas obtenidas por DES. Como sistemáticos observacionales, consideramos las condiciones de observación, como el seeing o el brillo del cielo; las propiedades del cartografiado, como el tiempo de exposición o la profundidad; y las fuentes astrofísicas, como la densidad estelar y la extinción por el polvo galáctico. Para caracterizar estos contaminantes, utilizamos mapas de propiedades del cartografiado (*SP maps* por sus siglas en inglés) en HEALPix, que dan cuenta de las variaciones espaciales de diferentes efectos relativos a la toma de imágenes. Partiendo de 107 de estos mapas, este número se reduce mediante dos métodos diferentes desarrollados en el marco de esta tesis: uno basado en la identificación de familias de mapas utilizando matrices de correlación de Pearson y el otro aplicando un análisis de componentes principales (PCA) a los mapas. De este modo, definimos dos bases de mapas de SP, la base estándar (STD) y la base de componentes principales (PC).

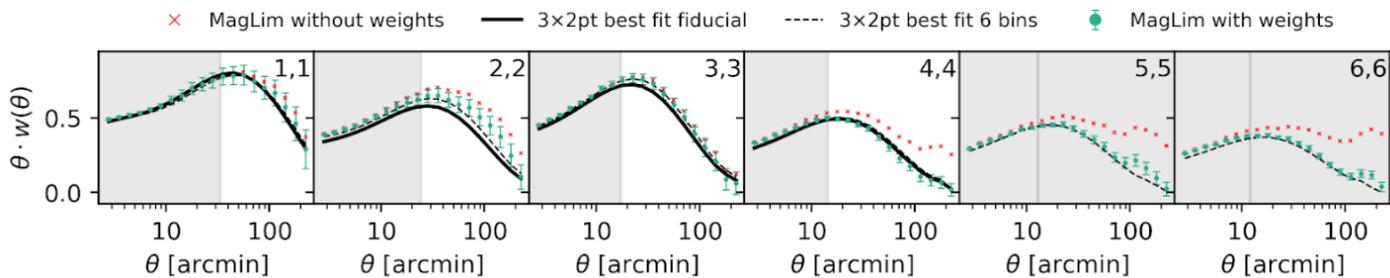
Para mitigar el impacto de los sistemáticos observacionales, aplicamos el método *Iterative Systematics Decontamination* (ISD). ISD es un método iterativo que evalúa la significación estadística de la contaminación causada por cada mapa SP mediante el ajuste de la relación entre sus valores en el cielo y la densidad de número de galaxias observada. La significación, S_{1D} , se obtiene calculando esta misma relación sobre catálogos simulados, libres de contaminación. Una vez identificado el mapa SP con la mayor significación, ISD corrige su impacto calculando un mapa de pesos y aplicándolo multiplicativamente a los datos, mitigando su contaminación. Este proceso se

Derecha: Resultados de la función de correlación angular medida en la muestra MagLim en DES-Y3. Las cruces rojas corresponden a los datos sin corrección por sistemáticos observacionales y los puntos verdes a los datos corregidos por ISD-PC < 50. La línea negra representa la función de correlación angular, $w(\theta)$, teórica dada por el mejor ajuste a partir del análisis de 3x2pt de DES-Y3. Las barras de error corresponden a la diagonal de la matriz de covarianza analítica y las regiones sombreadas representan las escalas angulares excluidas en los ajustes cosmológicos.

ejecuta iterativamente hasta que la significación de todos los mapas está por debajo de un umbral, T_{1D} , fijado de antemano. También presentamos el método *Elastic Net* (ENet), un método de corrección alternativo que realiza un ajuste multilineal a todos los mapas SP mediante una regularización *elastic net*. Así, controla el nivel de contribución de cada mapa SP a los pesos correctores. El método de referencia en DES-Y3 es ISD, mientras que ENet se usa para validación.

Una vez obtenidos los pesos correctores con ISD, es necesario validarlos para asegurar que no causan ningún tipo de sesgo en $w(\theta)$ y por tanto en la inferencia de parámetros cosmológicos. En esta tesis presentamos las pruebas de validación que se han implementado para esta tarea. Estas pruebas evalúan no sólo los mapas de pesos en sí mismos, sino que también permiten encontrar debilidades en nuestros métodos de descontaminación. Los principales sesgos que buscamos son el sesgo por falsa corrección y el sesgo por sistemáticos residuales. El primero se debe a posibles sobrecorrecciones causadas por la correlación fortuita entre los mapas SP y el campo de densidad que es tratada como contaminación real, eliminando así señal cosmológica real. El segundo es una posible infra-corrección de los datos debido a contaminación que no se ha eliminado correctamente. Determinamos la magnitud de estos sesgos tanto en la función de correlación como en la inferencia del parámetro cosmológico Ω_M y de la relación galaxia-materia, b^j , ambos sensibles a la amplitud de $w(\theta)$. Para estas pruebas, utilizamos simulaciones sin contaminación y, además, un conjunto de simulaciones contaminadas que reproducen los efectos sistemáticos observados en los datos. Llegamos a la conclusión de que el nivel de sesgo por falsa corrección está dentro de la incertidumbre estadística, mientras que el sesgo por sistemáticos residuales no puede ser despreciado. Para tener en cuenta este sesgo, marginalizamos sobre él añadiendo su contribución como error sistemático a la matriz de covarianza final utilizada para los ajustes cosmológicos. También tenemos en cuenta la diferencia entre los resultados obtenidos con ISD y ENet en los datos como un término sistemático adicional a la covarianza. Dado el aumento de la potencia estadística de los datos de DES-Y3, la caracterización y validación de la corrección de sistemáticos ha sido un reto importante.

Por último, presentamos los resultados de agrupamiento de galaxias obtenidos a partir de las dos muestras de galaxias lente una vez aplicadas y validadas las correcciones de sistemáticos. Estos resultados representan la medición de $w(\theta)$ obtenida en el mayor conjunto de galaxias hasta la fecha. Los problemas asociados con redMaGiC motivaron reevaluar numerosos aspectos del análisis de DES-Y3, incluida la corrección de sistemáticos observacionales. Estas pruebas adicionales son uno de los principales resultados presentados en esta tesis y han servido para garantizar la robustez de nuestras correcciones y elecciones en el análisis, así como para mejorar aún más nuestras metodologías.



Estudio del viento solar a 1 UA y sus valores atípicos

Autor: Carlos Larrodera Baca

Tesis doctoral dirigida por:

Consuelo Cid Tortuero

Centro: Universidad de Alcalá

Fecha de lectura: 5 de julio de 2022

El presente trabajo muestra los resultados del estudio de la distribución de viento solar a una unidad astronómica a través del estudio de diferentes magnitudes que caracterizan el viento solar.

En nuestro estudio proponemos la función de distribución biGaussiana para caracterizar la distribución del viento solar. Esta función se define como la suma de dos funciones Gaussianas donde cada una de ellas representa las contribuciones presentes en el viento solar, viento lento y viento rápido.

Esta separación es conocida y aceptada al referirse a la función de distribución de la velocidad del viento solar, pero no es tan conocida ni tan clara al referirse a otras magnitudes como la densidad, temperatura, campo magnético o composición. En nuestro análisis hemos confirmado que esta distribución bimodal también puede ser apreciada en estas últimas magnitudes.

El estudio del viento solar a través del estado de carga promedio del hierro ha puesto de manifiesto su utilidad como indicador para localizar eyecciones de masa coronal en el medio interplanetario (ICME). Gracias a este estudio hemos podido

encontrar ICMEs que no estaban listadas en los catálogos existentes, y también ha servido para redefinir sus límites en algunas ICMEs que sí estaban catalogadas.

Usando la teoría estadística de valores extremos, hemos analizado la cola de la distribución de las magnitudes representativas del viento solar donde se sitúan los eventos más extremos, para los cuales hemos podido obtener su periodo de retorno, es decir, el tiempo estimado en el que se espera que tenga lugar un evento de dichas características. Estos resultados teóricos han podido ser contrastados con medidas experimentales de los eventos más extremos registrados, confirmando que los resultados teóricos cuadran con las medidas realizadas por diferentes autores.

Nuestra investigación ha permitido desarrollar una herramienta de monitorización del viento solar en tiempo real que puede consultarse en la página web del Servicio Nacional de Meteorología Espacial (<http://www.senmes.es/section/2>), donde se muestra la evolución del viento solar en las últimas 24 horas, así como diferentes niveles de alerta basados en el análisis del conjunto de datos históricos de los últimos 20 años.

Diseño de sistemas optomecánicos para el nuevo telescopio robótico de 4-m

Autor: Asier Oria Carreras (asier.oria@pm.me)

Tesis doctoral dirigida por:

Carlos M. Gutiérrez de la Cruz

Centro: Universidad de La Laguna

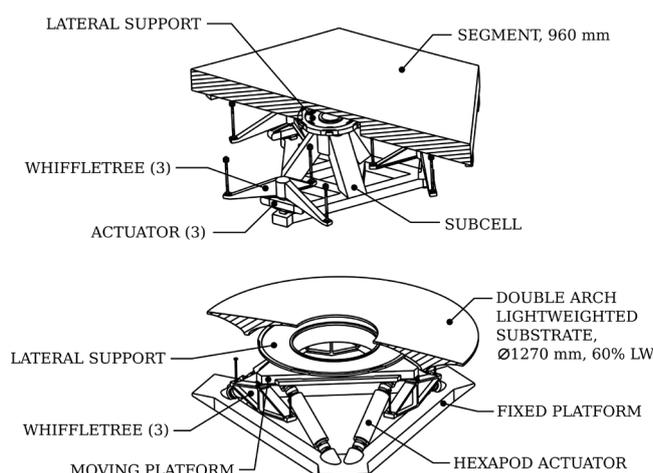
Fecha de lectura: 8 de julio de 2022

El interés en la astronomía de dominio temporal va en aumento año a año. La capacidad para detectar fenómenos transitorios cada vez más tenues motiva la necesidad de una nueva generación de telescopios robóticos más grandes y rápidos que puedan realizar una identificación, clasificación y caracterización espectroscópica eficiente de los mismos. El telescopio NRT (*New Robotic Telescope*) será el primero de esta nueva generación de telescopios robóticos, y su diseño se sustentará en la experiencia adquirida con el *Telescopio Liverpool*. Su primera luz está prevista para 2026 y con una apertura de 4m, un tiempo de respuesta inferior a 30 segundos y una ubicación privilegiada en un observatorio con las excelentes condiciones para la observación astronómica como el ORM, augura a convertirse en una instalación líder de la astronomía de dominio temporal. Como precursor de esta nueva clase de telescopios, algunos de sus sistemas, y en particular los más relacionados con la respuesta rápida y el funcionamiento autónomo, requieren soluciones innovadoras que definan nuevos estándares para futuros diseños. Esta tesis aborda los estudios y análisis optomecánicos que se han llevado a cabo durante la fase conceptual del proyecto NRT. Se discuten diferentes alternativas que contribuyan a alcanzar el requerimiento de apuntado rápido, se evalúan las implicaciones en la selección de la topología del espejo primario, y se plantea una primera propuesta de diseño para los sistemas optomecánicos del espejo primario y secundario.

Se ha desarrollado un modelo numérico para analizar el efecto de la mecánica del telescopio y de diferentes perfiles de movimiento en el requisito de tiempo de apuntado. Este modelo también considera el tiempo necesario para amortiguar la estructura y así cumplir con las exigencias del sistema óptico. Con este análisis se demuestra que una reducción de peso

en el sistema permite mejorar su rendimiento, lo que encaja a la perfección con la nueva tendencia de diseño de telescopios medianos basados en un espejo primario segmentado, que consiguen ser más rápidos y ligeros. El estudio identifica asimismo varias alternativas comerciales de motores que pueden ser adecuadas para este telescopio. Con el propósito de aligerar el sistema, se realiza un estudio de diferentes configuraciones segmentadas para el espejo primario. En concreto, se plantean una serie de alternativas basadas en espejos circulares y hexagonales, y se definen una serie de figuras de mérito que permiten compararlas en términos de peso, calidad de imagen y complejidad de su sistema de soporte. Este análisis concluye proponiendo para el NRT una configuración basada en 18 espejos hexagonales e independientes entre sí de 960 mm. Por último, se plantea una propuesta de diseño para el espejo primario y otra para el secundario del telescopio. Se comprueba que un segmento soportado axialmente mediante un árbol de palancas mecánico en nueve puntos, un diafragma central para el soporte lateral y tres actuadores piezoeléctricos, constituyen una solución sencilla y robusta que es capaz de cumplir con los requisitos del sistema. Para el espejo secundario de Ø1270 mm se propone un sustrato aligerado al 60% en forma de doble arco y soportado axialmente en seis puntos de apoyo como una solución de compromiso entre un coste moderado y una mejora de prestaciones. En caso de reducir el tamaño de este espejo (a Ø940 mm), también se identifica un sustrato de pared trasera abierta sobre tres puntos como una alternativa prometedora mucho más simple. El comportamiento de estos diseños se analiza primeramente mediante aproximaciones analíticas y posteriormente se optimiza mediante modelos paramétricos de elementos finitos. Asimismo, se aborda en detalle el proceso de corrección de parte del error del espejo secundario haciendo uso de los grados de libertad de los segmentos del espejo primario. Esta consideración permite relajar los requerimientos del sistema optomecánico del secundario y conseguir un diseño más ligero.

Probablemente, en un futuro cercano nuevos telescopios robóticos de similar tamaño y características acompañarán al NRT para permitir un seguimiento 24h de todo el cielo nocturno. Del mismo modo en el que actualmente cooperan las redes de pequeños telescopios robóticos, estas darán paso próximamente a redes de telescopios robóticos mucho mayores como el NRT. Este hito será el comienzo de una época dorada para la astronomía de dominio temporal, y seguramente permitirá revolucionar la manera en la que entendemos el Universo. La metodología y los análisis presentados en esta tesis pretenden convertirse en una guía útil para estos nuevos desarrollos.



Diseño conceptual de los segmentos del espejo primario (superior) y espejo secundario (inferior) del telescopio NRT.

Flujos de gas ionizados en la Nebulosa de Orión: propiedades y dependencias ambientales

Autor: José Eduardo Méndez Delgado (jemd@uni-heidelberg.de)

Tesis doctoral dirigida por: César Esteban y Jorge García-Rojas

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) / Universidad de La Laguna (ULL)

Fecha de lectura: 23 de septiembre de 2022

Esta tesis doctoral está dedicada al análisis de los objetos Herbig-Haro (HHs) de la región central de la Nebulosa de Orión y su impacto en el gas ionizado circundante.

Los HHs son chorros de gas colimados, eyectados desde protoestrellas. Aunque sus propiedades físicas y mecanismo de excitación han sido extensamente estudiados en nubes de gas neutro, la situación no es la misma con respecto a los HHs inmersos en regiones HII. El estudio de estos últimos objetos requiere el uso de espectroscopía de alta resolución espectral para poder separar su emisión de la radiación nebular de fondo, usando el desplazamiento Doppler. En esta tesis he empleado principalmente espectros de alta resolución espectral obtenidos con el espectrógrafo *Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph* (UVES) del *Very Large Telescope* (VLT) e imágenes de alta resolución espacial del *Telescopio Espacial Hubble* (HST). Las observaciones se centraron en HH529II, HH529III, HH204 y HH514, objetos localizados a diferentes distancias de la estrella ionizante principal de la Nebulosa de Orión, $\theta 1$ Ori C, y con diferentes velocidades aparentes de propagación.

El análisis realizado confirma que el mecanismo de excitación principal de estos HHs es la fotoionización, a diferencia de sus contrapartidas en las nubes de gas neutro, excitadas por ca-

lentamiento por choques. Esta característica permitió analizar los espectros ópticos de la muestra como regiones HII a pequeña escala, pudiendo determinar sus propiedades físicas, cinemáticas y abundancias químicas con una precisión y un nivel de detalle sin precedentes. Con las imágenes del HST y la información cinemática se determinaron las trayectorias tridimensionales de estos objetos, localizando su posible origen en distintas zonas de formación estelar de la Nebulosa de Orión. El impacto local de los HHs en el gas fotoionizado es importante ya que incrementan fuertemente la densidad local y disminuyen el grado de ionización. Estos fenómenos repercuten en las abundancias químicas obtenidas en regiones limitadas de la Nebulosa de Orión cuando se emplean espectros de resolución espectral intermedia o baja, donde se mezclan las distintas componentes cinemáticas.

En el estudio de HH514 se encontraron abundancias de He, N, O, Ne y Ar similares a las de la Nebulosa de Orión, mientras que el Fe/H, Ni/H y S/H presentan sobreabundancias anómalas, siendo la del último elemento de aproximadamente el doble del valor solar y de la propia nebulosa. Aunque parte del Fe y Ni gaseoso pudo haberse liberado durante la destrucción de granos de polvo en el choque de HH514 con el gas circundante, los mapas de emisión térmica infrarroja muestran que el polvo no ha sido totalmente destruido. La sobreabundancia de estos elementos parece originarse más bien en el arrastre de material desde las zonas internas del disco protoplanetario 170-337, donde emerge HH514. La posible existencia de formación planetaria en 170-337 generaría gradientes de presión en el disco, filtrando los granos de polvo más grandes, como los sulfuros (FeS, NiS), que podrían ser eyectados posteriormente con el resto del material de HH514. Esto podría ser evidencia indirecta de formación planetaria en zonas de formación estelar masiva, dentro de entornos fotoionizados inmersos en campos de intensa radiación ultravioleta.

Los resultados de la tesis se publicaron en una serie de tres artículos en las revistas científicas arbitradas *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* y *The Astrophysical Journal*: Méndez-Delgado et al. 2021a, Méndez-Delgado et al. 2021b y Méndez-Delgado et al. 2022b. También han sido la base de algunas notas de prensa: "Anatomía del impacto de un jet protoestelar en la Nebulosa de Orión" y "Posible evidencia de formación planetaria en la Nebulosa de Orión".

HH204, un objeto Herbig-Haro fotoionizado de la Nebulosa de Orión. La imagen fue tomada con la cámara WFPC2 del *Telescopio Espacial Hubble*. Las estrellas circundantes han sido enmascaradas en el panel derecho.

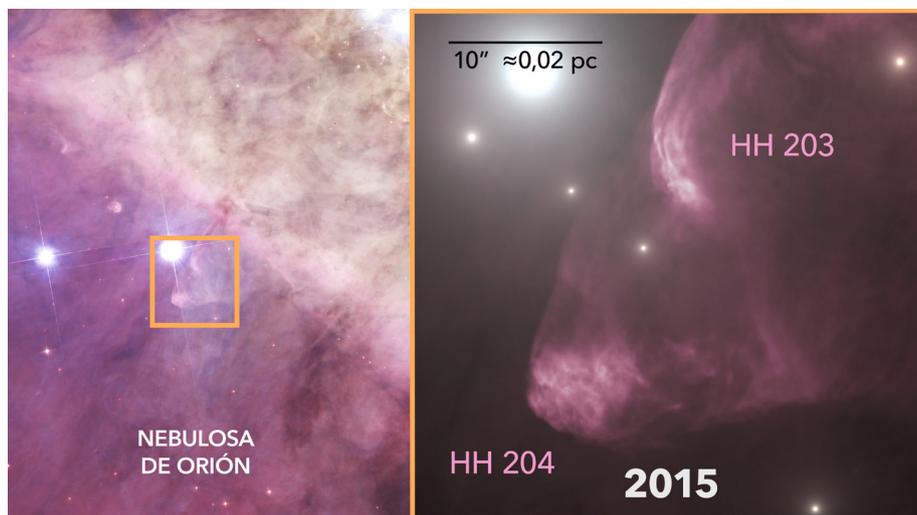


Imagen directa de exoplanetas fríos y templados en luz reflejada. Posibilidades de caracterización atmosférica y selección de potenciales objetivos

Autor: Óscar Carrión-González

Tesis doctoral dirigida por: Antonio García Muñoz, Heike Rauer y Dieter Breitschwerdt

Centro: Technische Universität Berlin

Fecha de lectura: 25 de marzo 2022

Los más de 5000 exoplanetas descubiertos hasta la fecha han revelado una diversidad de mundos insospechada hace solo unas décadas. A esto se suman miles de candidatos detectados y decenas de miles de nuevos descubrimientos previstos con los telescopios venideros tanto en tierra como en el espacio. Para entender en más detalle esta diversidad de exoplanetas es necesario pasar de la mera detección a la caracterización atmosférica. Esto proporcionará información única sobre su posible formación y evolución, así como sobre su actual composición y estructura atmosférica, incluyendo sus posibles condiciones de habitabilidad.

La población de exoplanetas conocidos está sin embargo sesgada hacia planetas gigantes, calientes y de corto período orbital, ya que son más fáciles de detectar con las principales técnicas de observación actuales: tránsitos y velocidad radial. La caracterización atmosférica de exoplanetas, hasta ahora realizada mayoritariamente mediante espectroscopía de tránsitos, presenta este mismo sesgo. Los exoplanetas fríos y templados de largo período han quedado generalmente fuera del alcance de estos análisis. El telescopio espacial *James Webb* comenzará a reducir este sesgo, haciendo espectroscopía de tránsito de algunos planetas templados y de baja masa en torno a estrellas enanas rojas. Se podrá así determinar si tales planetas pueden retener una atmósfera en torno a estrellas tan activas y, en tal caso, analizar sus capas atmosféricas superiores. Pese a esto, el *James Webb* no podrá acceder a planetas fríos y de largo período, así como a los planetas templados en torno a estrellas de tipo solar, entre los cuales se encuentran los potenciales análogos terrestres.

Estudiar esa población de planetas, así como el conjunto de planetas que no transitan, requerirá de observaciones en imagen directa. En esta tesis doctoral hemos analizado el potencial científico de la técnica de imagen directa en luz reflejada. Estas observaciones estarán disponibles desde esta misma década con el lanzamiento del telescopio espacial *Nancy Grace Roman*, dotado de un coronógrafo en el rango espectral visible. El objetivo de esta tesis es estudiar los fundamentos físicos de esta técnica y derivar conclusiones prácticas para la planificación e interpretación de las futuras observaciones.

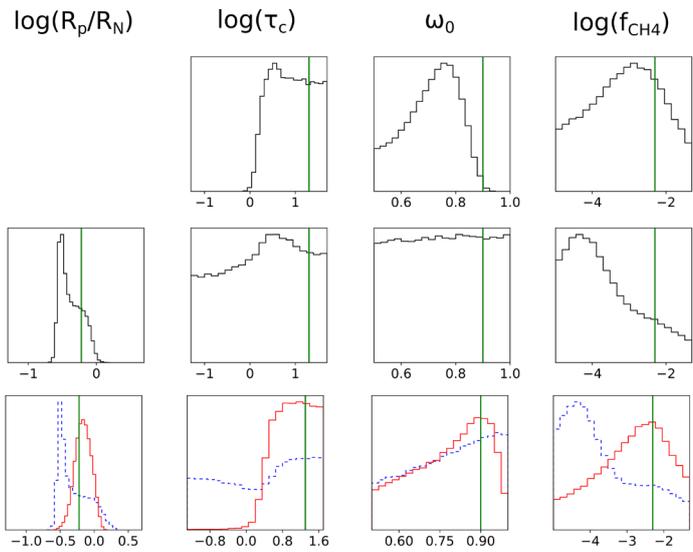
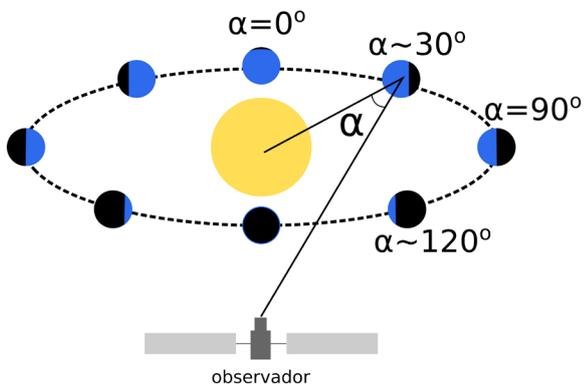
Como parte de esta tesis se ha desarrollado un código de *retrieval* atmosférico para observaciones de exoplanetas en imagen directa de luz reflejada (Carrión-González et al. 2020, A&A, 640, A136). El modelo diseñado incluye parámetros físicos especialmente relevantes para esta técnica tales como el radio planetario, lo cual nos ha permitido encontrar correlaciones entre parámetros que no habían sido reportadas previamente

en la literatura. En particular, uno de los principales resultados de esta tesis es que si el radio del planeta es desconocido se desencadenan correlaciones con otros parámetros atmosféricos como las propiedades ópticas de las nubes o la abundancia de gases absorbentes (CH_4). En síntesis, la imagen obtenida del planeta (un píxel) puede aparecer más brillante ya sea porque este tenga un mayor tamaño o porque tenga una atmósfera más reflectante (con nubes brillantes o menos CH_4). Encontramos por tanto que, aunque el radio no es un parámetro atmosférico en sí mismo, no conocer su valor afecta de manera clave a la caracterización atmosférica del planeta. Dado que los exoplanetas de largo período observables en imagen directa generalmente no transitarán, esta conclusión es relevante de cara a predecir el potencial científico de telescopios como el *Roman*.

También investigamos durante la tesis las posibles estrategias observacionales para superar estas correlaciones entre parámetros causadas por un radio planetario desconocido (Carrión-González et al. 2021, A&A, 655, A92). El código de *retrieval* atmosférico fue ampliado para habilitar la combinación de múltiples observaciones en diferentes posiciones orbitales. Comprobamos así que combinar medidas de un planeta a múltiples ángulos de fase (α , ver figura) es una estrategia efectiva para romper dichas correlaciones. En concreto, observar a ángulos de fase pequeños y grandes ($\sim 40^\circ$ y $\sim 120^\circ$) permite muestrear las asimetrías en la función de *scattering* de los aerosoles atmosféricos. Así, al caracterizar con precisión las propiedades ópticas de las nubes se reduce también la incertidumbre sobre los otros parámetros físicos correlacionados: la abundancia de especies gaseosas y el radio del planeta. Las implicaciones prácticas son que, a la hora de priorizar exoplanetas para observar en imagen directa de luz reflejada, aquellos con amplios rangos de ángulos de fase observables ofrecen mejores perspectivas de caracterización atmosférica. Para determinar qué exoplanetas son potenciales objetivos para telescopios de imagen directa y cuáles son prioritarios para análisis atmosféricos, esta tesis presenta un nuevo método estadístico que calcula la detectabilidad de cualquier planeta descubierto o aún candidato (Carrión-González et al. 2021, A&A, 651, A7). Procesando la información (e.g. del *NASA Exoplanet Archive*) y realizando miles de simulaciones orbitales para cada planeta conocido, podemos calcular su probabilidad de ser observable, así como el rango de ángulos de fase observables y otros parámetros de interés para la planificación de observaciones. En la tesis se aplicó este método al telescopio espacial *Roman* y actualmente se está aplicando a la siguiente generación de telescopios propuestos tanto en Europa como en EE. UU. Encontramos que hasta 25 planetas podrían ser accesibles con *Roman*, siendo la mayoría planetas gigantes fríos pero incluyendo también supertierras como tau Ceti e y f, en los límites de la zona de habitabilidad. La próxima generación de telescopios (LUVOIR, HabEx, LIFE) podrá observar varios cientos más de los planetas conocidos. A esta lista se añadirán los futuros descubrimientos en velocidad radial (con CARMENES o ESPRESSO), en astrometría (con Gaia) y en tránsitos de planetas de período largo (principalmente con PLATO).

Tesis disponible en:

<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-15465>



Retrievals atmosféricos para un planeta con nubes en comparación con el valor verdadero asumido para cada parámetro (líneas verticales verdes). Se muestran: el radio del planeta en relación al de Neptuno (R_p/R_N), el espesor óptico de la nube (τ_c), el single-scattering albedo de los aerosoles de la nube (ω_0) y la abundancia de metano en la atmósfera (f_{CH_4}). Fila superior: una única observación a fase 0° , asumiendo conocido el radio del planeta. En este caso se detecta la presencia de nubes al descartarse nubes con $\log(\tau_c) < 0$. Se puede estimar también la abundancia de CH_4 en la atmósfera. Fila intermedia: una única observación a fase 0° . R_p se asume desconocido y se incluye como un parámetro más en los retrievals. Se pierde toda la información sobre la presencia o ausencia de nubes y sobre la abundancia de CH_4 por las correlaciones de R_p con los parámetros atmosféricos. Fila inferior: combinación de varias observaciones asumiendo R_p desconocido. En línea azul discontinua se muestra la combinación de medidas a fase pequeña ($\sim 30^\circ$) y moderada (90°), sin observar demasiada mejora respecto a una única observación. En línea roja continua se combinan medidas a fase pequeña ($\sim 30^\circ$) y grande ($\sim 120^\circ$). Se aprecia en este caso una mejora significativa en todos los parámetros, detectándose la nube y determinando sus propiedades ópticas, así como estimando la abundancia de CH_4 y el radio planetario.

Anochece en Stonehenge, uno de los iconos más reconocibles de la arqueoastronomía.
Créditos: María L. Villodres.



**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