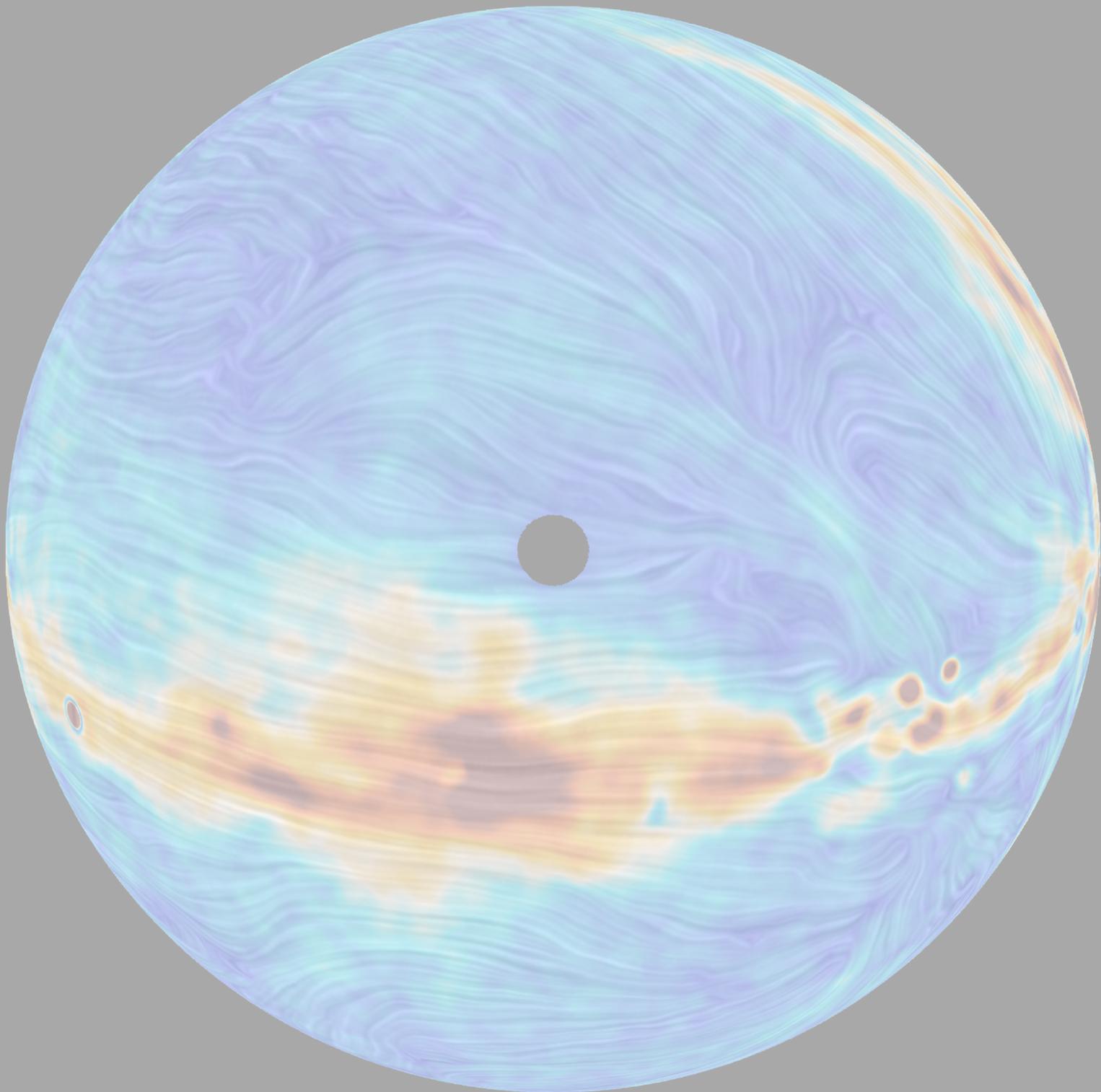


SEA
Sociedad Española de Astronomía



Portada: Mapa de la emisión polarizada en microondas en el hemisferio norte medido por QUIJOTE.
Créditos: Experimento QUIJOTE.

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

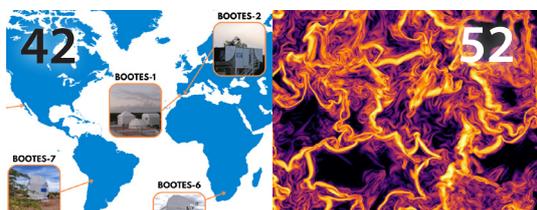
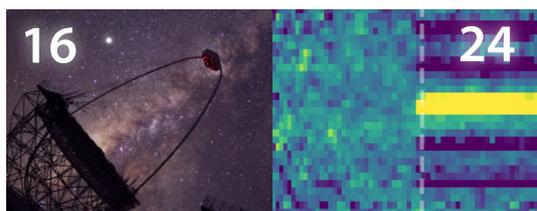
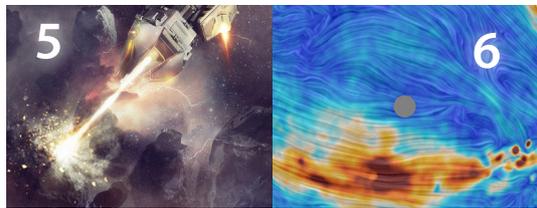
Sociedad Española de Astronomía SEA

www.sea-astronomia.es

Comisión de Información

comi-info@sea.am.ub.es

CONTENIDOS



- 5 Editorial
- 6 El experimento QUIJOTE: diez años observando la polarización del cielo en microondas
- 16 Primeros resultados del LST-1 de CTA
- 24 ¿Está el paradigma Λ CDM en peligro por los primeros resultados de JWST?
- 30 ARRAKIHS: Una nueva luz sobre la materia oscura
- 36 El seguimiento e impacto de pequeños asteroides: reto y oportunidad científica
- 42 La red global BOOTES de telescopios robóticos
- 52 Espectroscopía al límite: modelado multi-resolución de observaciones
- 58 Todos los 11 de febrero cuentan
- 62 Habla con Ellas: Mujeres en Astronomía
- 66 Noticias
- 68 Ecos de (la) Sociedad
- 69 Libros
- 70 Tesis doctorales

Imagen infrarroja ultraprofunda
del cúmulo de galaxias SMACS
0723, tomada por la cámara
NIRCam del telescopio espacial
James Webb (JWST). Crédito:
NASA, ESA, CSA y STScI.





EDITORIAL

Abrimos este nuevo número del boletín con los resultados más precisos de polarización en microondas de nuestra galaxia, gracias a las observaciones con Quijote durante 10 años. Dando un salto de gigante, nos vamos al extremo opuesto en el espectro electromagnético, presentando algunos de los primeros resultados de rayos gamma de muy alta energía con el primer Large Size Telescope de CTA.

Las primeras observaciones con el JWST han traído muchos resultados preliminares de gran interés, en este boletín se incluye una breve descripción de estos resultados en el contexto del paradigma Λ CDM. También los responsables del proyecto ARRAKIHS, primera misión ESA liderada por España, nos cuentan sobre este proyecto para desentrañar la naturaleza de la materia oscura.

Volviendo a proyectos terrestres, se habla del seguimiento de asteroides con sello español, así como también la culminación de la instalación de la red global de telescopios BOOTES. Un equipo ERC nos cuenta sobre su innovador proyecto en espectroscopia solar.

Con el fin de reducir la brecha de género y visibilizar el trabajo científico por referentes femeninos, nuestras compañeras nos cuentan dos proyectos interesantes e innovadores, un concurso de comics y el programa de divulgación "Habla con Ellas". Esperemos que, en un futuro no lejano, la necesidad de este tipo de programas no sea más que una anécdota.

Y por último nos hacemos eco de dos noticias importantes en la comunidad: la aprobación por parte del consejo de ministros de la adhesión de España al observatorio SKA, y la inauguración de Galáctica, centro de difusión y práctica de la Astronomía en Teruel.

Además de estos temas, encontrarán como siempre las secciones de Ecos de Sociedad, la reseña de libro y los resúmenes de las tesis doctorales.

¡Feliz solsticio!

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

EL EXPERIMENTO QUIJOTE: DIEZ AÑOS OBSERVANDO

Tras una década desde que se iniciaran sus observaciones, la colaboración QUIJOTE ha presentado en una serie de artículos la descripción más precisa hasta la fecha de la polarización de la emisión en microondas de la Vía Láctea. Los nuevos mapas proporcionan imágenes de nuestra Galaxia en el rango espectral de 10-20 GHz, complementando así los resultados de misiones espaciales previas (Planck y WMAP) dedicadas al estudio del fondo cósmico de microondas (FCM). Estos mapas proporcionan información de la estructura del campo magnético galáctico y ayudarán a comprender los procesos energéticos que tuvieron lugar en el nacimiento del Universo.



Ricardo Tanausú Génova Santos
rgs@iac.es



José Alberto Rubiño Martín
jalberto@iac.es

Instituto de Astrofísica de Canarias

En representación de
la Colaboración QUIJOTE

Algunas de las predicciones de la *teoría general de la relatividad*, como la curvatura de los rayos de luz por el efecto de interacción con un campo gravitatorio, fueron confirmadas poco después de su publicación en 1915. Otra importante predicción de esta teoría, la existencia de ondas gravitacionales, tuvo que esperar exactamente un siglo para ser confirmada. Concretamente hasta la detección del experimento LIGO en 2015. Una onda gravitacional es la propagación de una deformación del espacio-tiempo creada por masas en movimiento. Eventos muy energéticos en el Universo, como la colisión de agujeros negros, generan ondas gravitacionales con amplitudes que, aun siendo pequeñas, son lo suficientemente grandes para ser detectadas por experimentos ultra-precisos como LIGO. El mismo origen del Universo, y en particular una etapa de expansión extremadamente rápida que de acuerdo con modelos teóricos desarrollados en los años ochenta debió producirse justo después del *Big Bang*, conocida como *inflación*, debió también generar ondas gravitacionales. Debido a que las propiedades (amplitud y periodo) de estas ondas son diferentes a las de origen "local" que detecta LIGO, no es posible su detección directa. Sin embargo, gracias a desarrollos realizados a finales de los años noventa, se sabe que estas ondas gravitacionales del *Big Bang* deben haber dejado una huella o patrón específico (conocido como *modo B*) en la polarización del *Fondo Cósmico de Microondas* (FCM), que es precisamente la radiación remanente del *Big Bang*, originada cuando el universo tenía "sólo" unos 400 mil años. La detección de esta señal no sólo supondría un espaldarazo al modelo inflacionario, sino que daría pie a estudiar procesos físicos generados en un dominio de energía no explorado hasta ahora.

La radiación del FCM, y en particular sus anisotropías (fluctuaciones de intensidad en función de la dirección de observación), ha sido ampliamente escudriñada durante los últimos 30 años por una multiplicidad de experimentos, algunos de ellos situados en el Observatorio del Teide, y también por tres misiones espaciales, la más reciente de ellas el satélite Planck de la ESA, en el que España tuvo una importante contribución instrumental y científica. Estos estudios han dado lugar a grandes avances en nuestro conocimiento de la estructura, composición y evolución del Universo, y también han confirmado que la energía oscura y la materia oscura son sus

LA POLARIZACIÓN DEL CIELO EN MICROONDAS

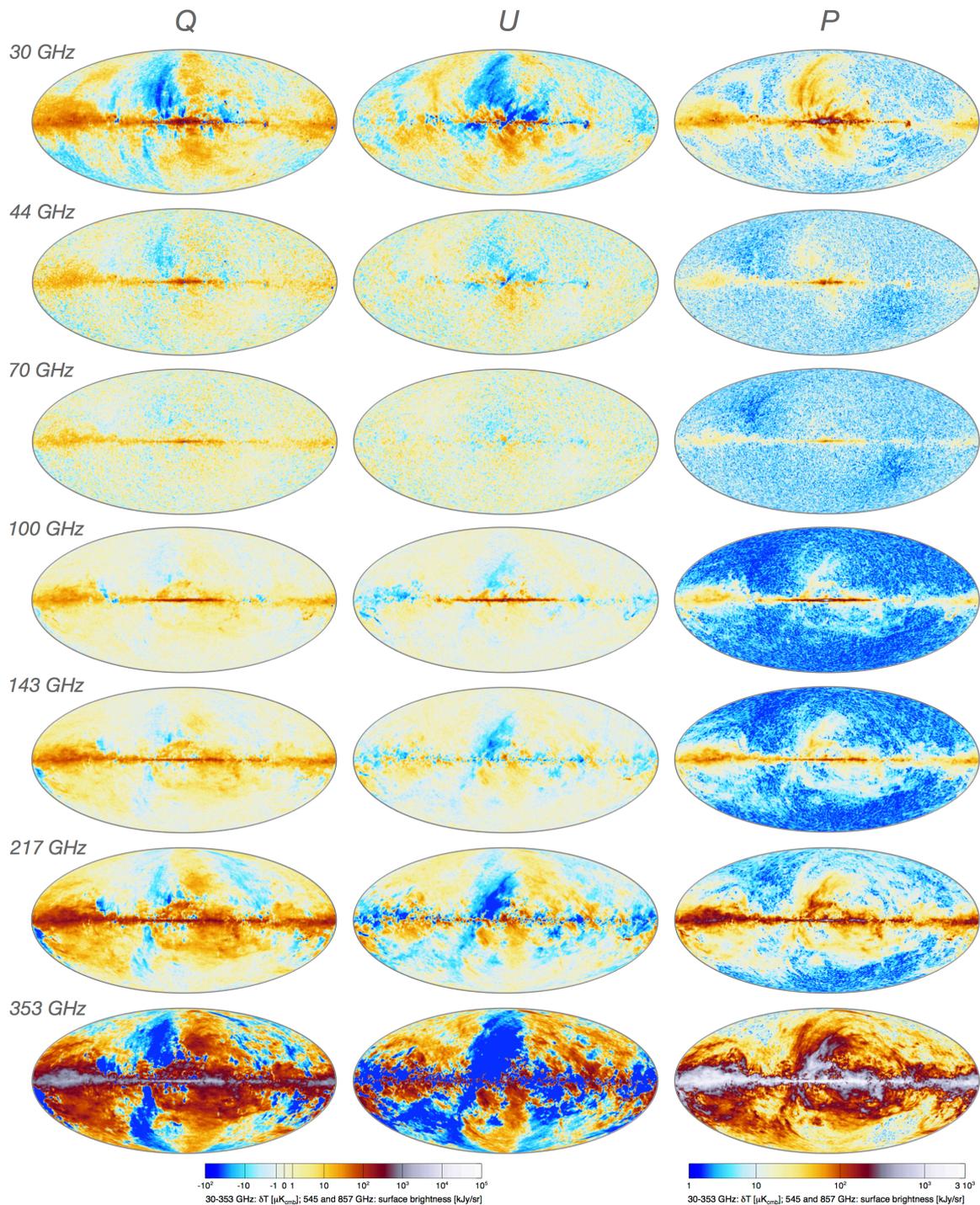


Figura 1. Mapas de intensidad y de polarización lineal (parámetros de Stokes Q y U, e intensidad polarizada P) de todo el cielo obtenidos por el satélite Planck entre 30 y 353 GHz. La emisión sincrotrón es claramente visible en bajas frecuencias, particularmente a 30 GHz. A frecuencias por encima de 100 GHz, la emisión térmica (vibracional) de granos de polvo empieza a ser importante, dominando por completo los mapas de 353 GHz. El mínimo de la emisión combinada de estos dos contaminantes galácticos se produce a una frecuencia cercana a 70 GHz. Crédito: Colaboración Planck (<https://www.cosmos.esa.int/web/planck/picture-gallery>).

dos componentes principales, a pesar de que aún no sabemos muy bien qué son. Sin embargo, debido a su muy baja intensidad, la detección de los modos B en la polarización del Fondo Cósmico de Microondas es mucho más complicada. Por ello, de manera similar a como ocurrió con el experimento LIGO, se ha tenido que esperar a poder desarrollar tecnologías específicas y con el nivel de precisión y calidad suficientes para poder ser implementadas en experimentos que permitan abordar estos estudios. Además de los fotones del FCM, estos experimentos, como es el caso de QUIJOTE, reciben radiación originada en nuestra propia Galaxia, que se superpone y contamina la radiación primordial (ver Figura 1). Esto añade un desafío adicional a los de carácter instrumental que hay que superar. Pero, como en el caso de LIGO y las ondas gravitacionales de origen cercano, los grandes descubrimientos y la confirmación de grandes teorías suelen suponer enfrentarse a esfuerzos experimentales y observacionales de envergadura.

EL EXPERIMENTO QUIJOTE

Desde principios de los años 80, tras la instalación del experimento Tenerife, el Observatorio del Teide ha desempeñado un importante papel en las investigaciones del Fondo Cósmico de Microondas. A este experimento, fruto de una colaboración entre el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y las Universidades de Manchester y Cambridge, le sucedieron varios otros dedicados a la medida de las anisotropías del FCM con gradualmente mayor sensibilidad. El último de esta serie de proyectos es el experimento QUIJOTE, el primero diseñado específicamente para la medida de la polarización del FCM. Este experimento cubre un rango de la ventana de microondas entre 10 y 40 GHz, siendo así complementario a los que observan desde Tierra normalmente en frecuencias más altas, donde la contaminación atmosférica es más importante, y también a las misiones espaciales WMAP y Planck, que observaron en frecuencias por encima de 23 y 30 GHz respectivamente. Esta característica hace que los datos de QUIJOTE sean sensibles no sólo a la radiación primigenia del FCM, sino a la radiación sincrotrón, un tipo de emisión generada por la aceleración de los rayos cósmicos en el campo magnético de nuestra Galaxia. Esta radiación, junto con la emisión producida por granos de polvo del medio interestelar, son los dos mecanismos de emisión galáctica que presentan polarización, y por lo

tanto introducen una contaminación sobre la señal de modos B en la polarización del FCM (ver Figura 1). Es por ello que su estudio, la precisa caracterización observacional de sus propiedades espectrales, es una tarea ineludible para poder desmascarar la señal de los modos B en los mapas producidos por QUIJOTE y otros experimentos. QUIJOTE es el único experimento multifrecuencia que ha observado la polarización de grandes áreas de cielo en frecuencias por debajo de 20 GHz, y por lo tanto el que ha proporcionado la información más precisa de la polarización de la emisión sincrotrón, cuya amplitud aumenta a medida que disminuye la frecuencia dentro del rango de radio.

QUIJOTE es una colaboración liderada por el IAC y tiene la participación del Instituto de Física de Cantabria y de las universidades de Cantabria, Cambridge y Manchester. Una lista actualizada de los miembros de la colaboración QUIJOTE puede verse en <https://research.iac.es/proyecto/quijote/pages/en/group-members.php>. El proyecto consiste en dos telescopios de 2.3 m de diámetro denominados QT1 y QT2 (ver Figura 2), y tres instrumentos: el experimento multi-frecuencia (MFI), que cubre cuatro bandas de frecuencia centradas en 11, 13, 17 y 19 GHz, otro que observa a 30 GHz (TGI) y un tercero a 40 GHz (FGI). Con esta combinación de tamaño de la óptica y rango de frecuencias se consiguen resoluciones angulares de un grado y algo menores, que son idóneas para el estudio del FCM en las escalas angulares en las que se espera la señal de modos B primordiales. La latitud geográfica de Tenerife permite acceder a una gran parte de la esfera celeste, en concreto a aproximadamente el 75% de todo el cielo (declinaciones por encima de -32 grados) cuando se realizan observaciones a una elevación sobre el horizonte de 30 grados (no es conveniente realizar observaciones a elevaciones más bajas porque aumenta mucho la contaminación atmosférica). Como se explica debajo, con el MFI se cubrió toda esta área de cielo para producir los mapas que se muestran en la Figura 3. También se realizaron observaciones sobre regiones más pequeñas pero con una mayor sensibilidad gracias al mayor tiempo de integración por unidad de área. Desde el año 2018, el TGI y el FGI han realizado observaciones también sobre regiones de interés de pequeño tamaño y en los próximos meses empezarán una nueva campaña de observación en una configuración mejorada (con un mayor número de detectores).



Figura 2. Telescopios QUIJOTE (QT1 y QT2) en el Observatorio del Teide. El MFI (10-20 GHz) estuvo instalado en el QT1 (en segundo plano), mientras que el instrumento TFGI (30 y 40 GHz) opera en el QT2 (en primer plano). Créditos: Daniel López/IAC.

“MFI WIDE SURVEY”: UN CARTOGRAFIADO DEL CIELO NORTE CON MFI

Desde la concepción del proyecto QUIJOTE, uno de los principales objetivos científicos del instrumento MFI era la obtención de mapas en intensidad y polarización de todo el hemisferio norte en el rango de frecuencias de 10 a 20 GHz. El denominado “MFI wide survey” es un conjunto de 4 mapas que trazan la emisión en intensidad y polarización lineal del cielo en las frecuencias de 11, 13, 17 y 19 GHz, y que cubren unos 29,000 grados cuadrados que incluyen todo el hemisferio norte (Rubíño-Martin et al. 2023). Estos mapas son el resultado de unas 10,000 horas de observación con el MFI distribuidas durante el periodo de Mayo de 2013 a Junio de 2018. Los mapas obtenidos tienen una resolución angular de aproximadamente un grado,

y sensibilidades típicas en polarización lineal de unos 40 microK por grado cuadrado. La Figura 3 muestra el mapa obtenido para 11GHz.

El conjunto de los cuatro mapas de frecuencia, junto con otros productos asociados (incluyendo por ejemplo los catálogos de radiofuentes presentes en los mapas) fueron liberados a la comunidad científica en enero de 2023 (<https://research.iac.es/proyecto/quijote/>), junto con una serie inicial de 6 artículos. Esta serie se está completando en estos momentos con otras publicaciones, dos de las cuales ya se han enviado a publicar.

Los mapas de polarización obtenidos proporcionan una descripción de la emisión galáctica de calidad comparable a la obtenida por los satélites WMAP

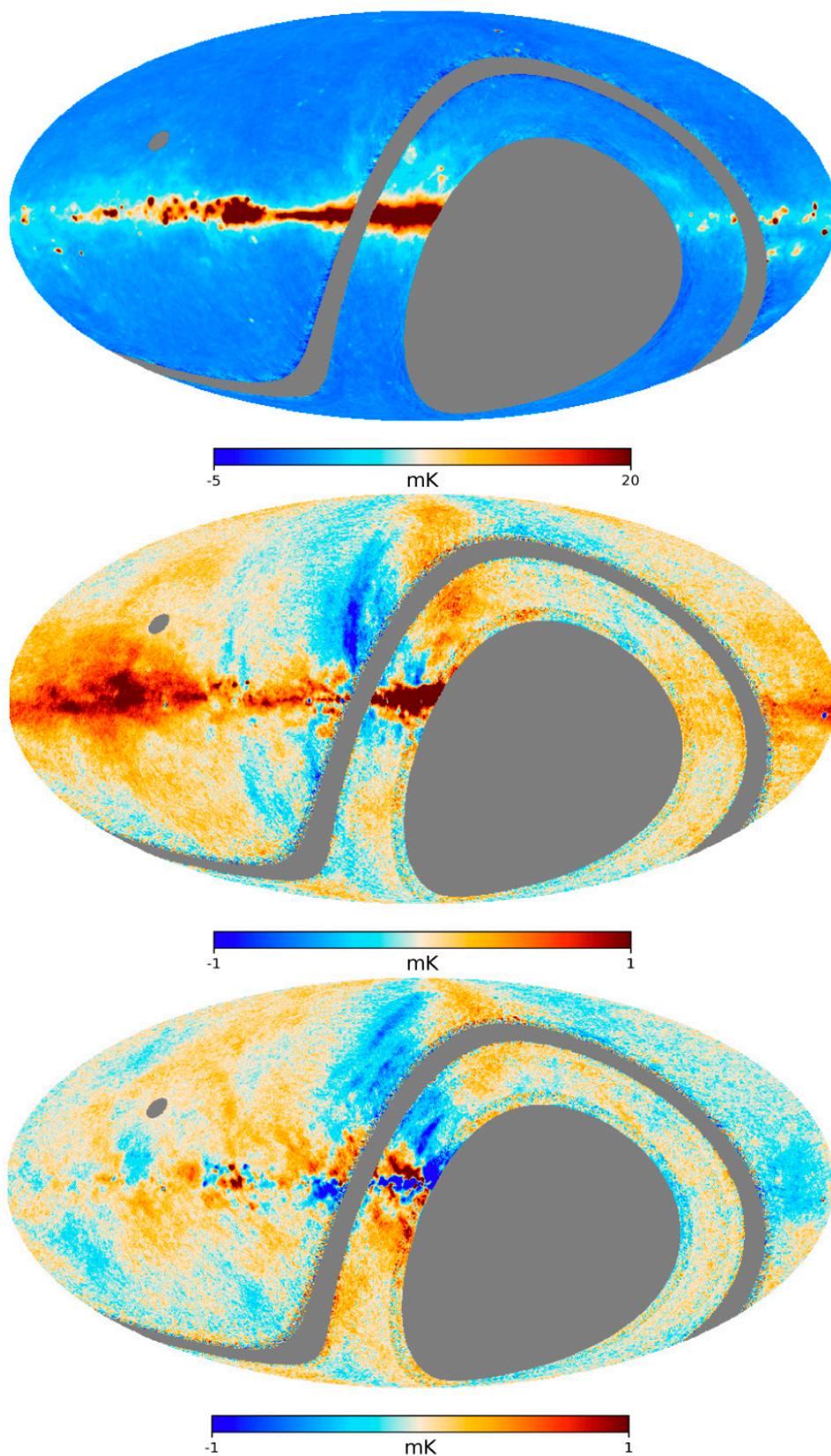


Figura 3. Mapas obtenidos por QUIJOTE MFI a 11GHz. Se representan la intensidad (arriba), y los parámetros de Stokes Q y U (centro y abajo respectivamente) en coordenadas galácticas. Adaptado de Rubiño-Martín et al. (2023). Créditos: Colaboración QUIJOTE.

(NASA) y Planck (ESA), abriendo la posibilidad de estudiar por primera vez la dependencia espectral de la emisión de cielo en frecuencias de microondas. Los datos de QUIJOTE-MFI permiten reconstruir incluso las grandes escalas angulares en el cielo, que habitualmente no son accesibles con experimentos desde Tierra. Esto proporciona una constatación de la estabilidad y transparencia de la atmósfera en los Observatorios de Canarias para este tipo de estudios.

Uno de los rasgos que llama la atención de estos mapas es la franja que queda sin observar alrededor de la línea de declinación cero grados. Esta zona corresponde a la localización de los satélites geoestacionarios (principalmente de comunicaciones), que emiten en este rango de las microondas, y que debemos evitar con nuestro instrumento. Volveremos sobre este punto más abajo.

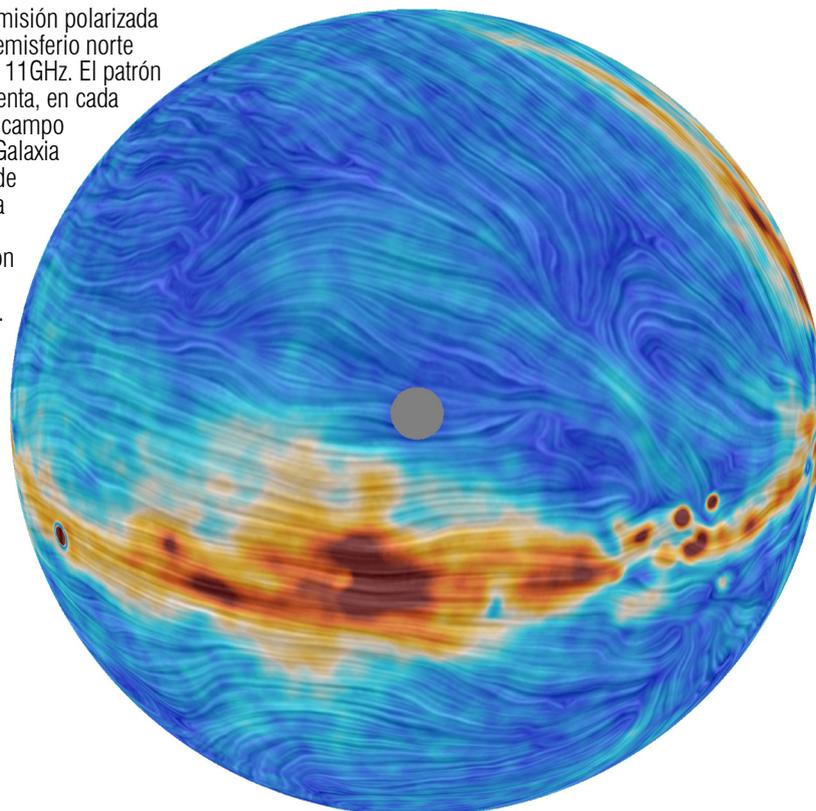
EMISIÓN POLARIZADA DE NUESTRA GALAXIA: LA RADIACIÓN SINCROTRÓN Y EL CAMPO MAGNÉTICO

Nuestra Galaxia es brillante en microondas y radio. El proceso físico de emisión más importante en estas frecuencias es la radiación sincrotrón, debida a las aceleraciones que sufren los rayos cósmicos (principalmente electrones) en presencia del campo magnético

galáctico. La caracterización de su distribución espectral de energía proporciona por tanto información sobre las energías relativistas de los electrones, que son principalmente originados y acelerados en las grandes explosiones de supernovas en nuestra Galaxia.

El sincrotrón es una emisión con un alto grado de polarización, y se encuentra íntimamente ligada a la distribución de las líneas de campo magnético galáctico. El grado de uniformidad espacial de estas líneas de campo magnético está directamente relacionado con la coherencia en la dirección de polarización de la emisión radiada por electrones individuales, de forma que cuanto más uniforme y regular sea el campo magnético, mayor será el nivel de polarización de la emisión producida por un conjunto de electrones en una determinada línea de visión. Los mapas de QUIJOTE proporcionan por tanto una visión de la estructura de la componente regular del campo magnético, tal como se muestra en la Figura 4. Las líneas de campo están más ordenadas a lo largo del plano galáctico, donde siguen la estructura espiral de nuestra Galaxia. Por encima y por debajo de este plano la estructura del campo magnético se vuelve menos regular.

Figura 4. Mapa de la emisión polarizada en microondas en el hemisferio norte medido por QUIJOTE a 11GHz. El patrón difuso de trazos representa, en cada punto, la dirección del campo magnético de nuestra Galaxia (a 90° de la dirección de polarización). La escala de color representa la intensidad de la emisión polarizada. Crédito: Colaboración QUIJOTE.



El estudio detallado de los mapas de QUIJOTE, en combinación con los de Planck y WMAP, ha permitido extraer por primera vez información de la dependencia espectral del sincrotrón galáctico polarizado en escalas angulares mayores que un par de grados (de la Hoz et al. 2023). Uno de los resultados más sorprendentes e importantes de este análisis es que la emisión sincrotrón polarizada de nuestra Galaxia es mucho más variable espacialmente de lo que se pensaba. Los modelos previos a los datos de QUIJOTE muestran una variabilidad espacial en el índice espectral de la emisión que resulta ser un factor 2.5 veces menor que la variabilidad real encontrada. Y más aún, los datos de QUIJOTE empiezan a sugerir la presencia de curvatura en la distribución espectral del sincrotrón. Estos resultados son de enorme importancia para la búsqueda de modos B inflacionarios. La emisión polarizada de nuestra Galaxia es más brillante que la posible señal primordial de modos B en cualquier rango de frecuencias. Ya sabíamos, tras el reanálisis de los datos del experimento BICEP en combinación con los de Planck, que la emisión de los granos de polvo en polarización supone un velo importante a la señal cosmológica que es necesario corregir. Pues bien, los mapas de QUIJOTE proporcionan una información única para corregir la parte de ese velo debida al sincrotrón galáctico. Podríamos decir que para comprender los procesos energéticos que tuvieron lugar en el nacimiento del Universo, antes debemos comprender el magnetismo en nuestra Galaxia.

EMISIÓN ANÓMALA DE MICROONDAS

Se ha dicho anteriormente que los dos mecanismos de emisión galáctica que presentan un alto grado de polarización son la emisión sincrotrón y la emisión producida en granos de polvo del medio interestelar, que también son alineados por el campo magnético galáctico. La primera es estudiada por experimentos que como QUIJOTE observan en frecuencias bajas, mientras que la segunda se manifiesta en frecuencias más altas y es por ello que es estudiada por experimentos que operan típicamente por encima de 100 GHz, en el infrarrojo lejano. En intensidad total, además de estos dos mecanismos, en el rango de microondas y radio se manifiestan la emisión libre-libre, y también la conocida como “Emisión Anómala de Microondas” (EAM). Mientras que la emisión libre-libre producida en plasmas ionizados es uno de los mecanismos clásicos de emisión en radio, la EAM es un mecanismo descubierto hace relativamente poco tiempo, a finales de los años 90 en datos del satélite COBE. Desde los

primeros estudios observacionales se sabía que esta emisión presentaba un alto grado de correlación espacial con la emisión de polvo térmico, y de ahí se derivaron las primeras ideas de que debía ser originada por algún mecanismo físico asociado a los mismos granos de polvo del medio interestelar. Observaciones posteriores en regiones compactas, incluyendo medidas realizadas con el experimento COSMOSOMAS (Observatorio del Teide) en la nube molecular de Perseo, permitieron caracterizar con precisión su espectro, concluyendo que presenta un máximo entre 20 y 30 GHz, con una caída pronunciada en frecuencias inferiores y superiores (véase Figura 5). Esta forma espectral es reproducida con bastante exactitud por modelos teóricos basados en emisión de tipo dipolo eléctrico por granos de polvo en rotación. Su origen estaría entonces en granos de polvo en el medio interestelar que presentan un momento dipolar eléctrico y que se encuentran en rotación con altas velocidades angulares como consecuencia de algún mecanismo de excitación. Gracias al éxito de este modelo habitualmente a la EAM se la conoce también como “emisión de polvo rotante”. Sin embargo, hay modelos alternativos que no pueden ser descartados, y además existen varias otras incertidumbres importantes como la composición de los granos de polvo que la originan, el mecanismo de alineamiento de los granos con el campo magnético, o cuál es el nivel de polarización de la EAM. Esto último es particularmente importante en lo relativo a la detección de los modos B primordiales.

La cobertura espectral de QUIJOTE resulta particularmente útil y relevante a la hora de trazar no sólo el pico de la EAM, alrededor de 20-30 GHz, sino también su caída en brillo a frecuencias inferiores. Por ello los datos de QUIJOTE han sido cruciales a la hora de mejorar la separación entre la EAM y las otras componentes de emisión en intensidad, el libre-libre y la radiación sincrotrón, en este rango de frecuencias. Esto queda ilustrado en la Figura 5, donde se muestra la distribución espectral de energía de la nube molecular de Perseo, que proporciona uno de los ejemplos más claros y limpios de EAM. Esta figura ha sido extraída de uno de los artículos asociados al *wide survey*, en el que presentamos un amplio estudio de las propiedades de la EAM en un conjunto de 52 regiones individuales (Poidevin et al. 2023). Este estudio permitió confirmar algunas de las propiedades más importantes de la EAM, como por ejemplo su correlación con la emisión del polvo térmico, su relación con la intensidad del campo de radiación

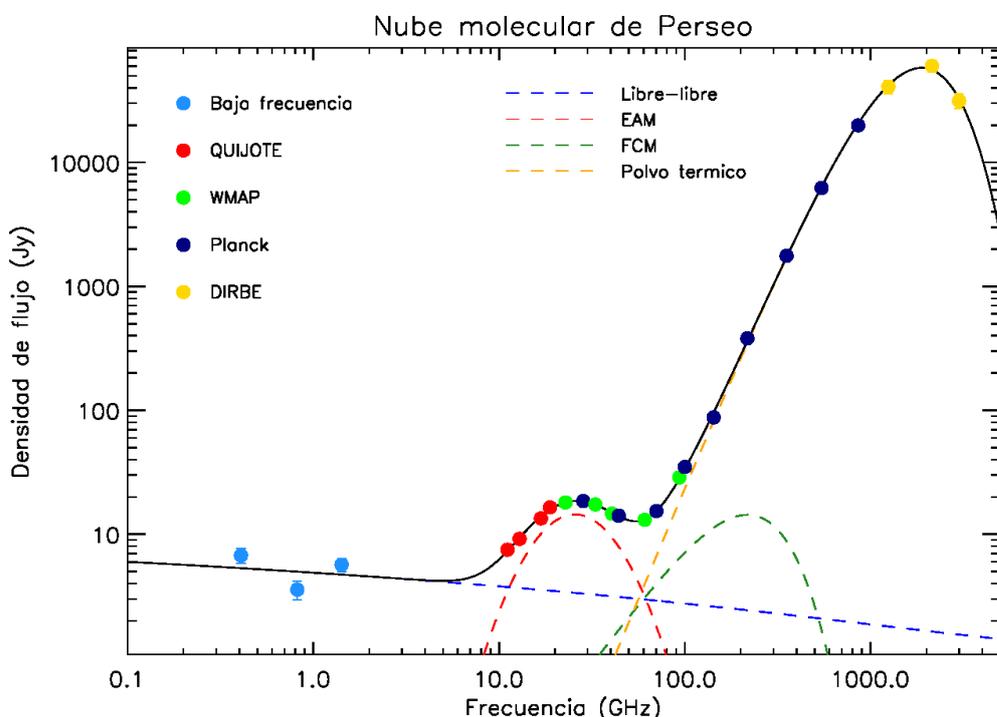


Figura 5. Distribución espectral de energía en la nube molecular de Perseo, mostrando los puntos observados (QUIJOTE en rojo) y el modelo teórico ajustado a los datos (línea continua negra - las líneas de colores a trazos representan por separado los modelos correspondientes a los distintos mecanismos de emisión). Figura adaptada de Poidevin et al. (2023).

o la variación de la frecuencia donde se produce su máximo de emisión. Los datos de QUIJOTE también han permitido obtener las cotas más precisas sobre el nivel de polarización de la EAM, y en concreto utilizando datos en la región molecular W43 se ha establecido que su fracción de polarización es inferior a 0.2% (Génova-Santos et al. 2017), mejorando en un factor 5 las mejores cotas obtenidas anteriormente. Además de ayudar a restringir algunos parámetros o modelos de EAM, este resultado es importante a la hora de determinar el nivel de contaminación que esta emisión podría introducir sobre la señal primordial de modos B. Aunque obtener una cota tan baja es de por sí importante, que implicaría que la EAM podría ser ignorada en la búsqueda de estos modos B, hay que tener presente que ésta y otras cotas provienen de regiones específicas, con condiciones físicas particulares, y es complicado o al menos arriesgado extraer conclusiones generales firmes, por lo que sigue siendo necesario profundizar en este tipo de estudios.

PERSPECTIVA FUTURA PARA ESTA DÉCADA: EL LABORATORIO DE FONDO DE MICROONDAS EN EL OBSERVATORIO DEL TEIDE (CMBLAB)

Desde 2018, el segundo telescopio del experimento QUIJOTE ha estado tomando datos de cielo en las frecuencias de 30 y 40 GHz con los detectores de los instrumentos TGI y FGI, aunque las observaciones no han tenido una continuidad en el tiempo hasta hace poco debido a diversas razones (principalmente la pandemia, y la resolución de un problema en el nivel de vacío del criostato). Desde hace pocos años, un instrumento híbrido que combina detectores de TGI y FGI en un mismo criostato, y que denominamos TFGI (Thirty and Forty GHz Instrument), continuará sus observaciones con el objetivo de completar (entre otras) observaciones profundas en tres regiones de cielo de 1000 grados cuadrados cada una y de baja contaminación galáctica (los denominados campos cosmológicos), y varias regiones específicas del plano galáctico con emisión intensa de EAM.

En relación al QT1 (primer telescopio QUIJOTE), el instrumento MFI finalizó sus observaciones en 2018. Desde entonces, el grupo del IAC ha estado fabricando un nuevo instrumento de baja frecuencia mejorado, denominado MFI2. El nuevo instrumento ya está fabricado, integrado y probado en laboratorio, e iniciará su fase de comisionado en la segunda mitad de 2023. La motivación científica del MFI2 es evidente: QUIJOTE es el único experimento de FCM en el mundo que proporciona medidas en ese rango de 10-20 GHz, que se ha mostrado crítico para la comprensión de las propiedades de polarización del sincrotrón y la EAM al nivel requerido para poder corregir estas emisiones en experimentos o misiones espaciales futuras. La sensibilidad de MFI2 será entre dos y tres veces mejor que la del anterior MFI, pero el salto novedoso en el diseño del instrumento proviene del uso de un sistema de adquisición completamente digital basado en SoC FPGAs (System-on-Chip Field Programmable Gate Array). Estos sistemas, con la posibilidad de muestrear la señal espectral de entrada con resoluciones de 1 MHz, proporcionan una herramienta muy poderosa para eliminar la contaminación en radio de satélites geoestacionarios (haciendo así accesible la franja alrededor de declinación cero grados en la Figura 3) y de otras fuentes de contaminación en microondas, como las nuevas mega-constelaciones de satélites (Starlink, OneWeb, etc). Estas últimas constituyen un serio problema para la astronomía desde la Tierra, de manera que sin estos sistemas y estrategias de mitigación, el cielo en las frecuencias de MFI2 no sería observable con los anchos de banda necesarios para obtener alta señal a ruido.

Más allá de esta instrumentación para QUIJOTE ya existente, la perspectiva de observaciones de FCM desde el Observatorio del Teide viene definida por el denominado Laboratorio de FCM (CMBLab). Junto a QUIJOTE, en los próximos años se observará el cielo en microondas y submilimétrico con GroundBIRD (liderado por RIKEN en Japón y ya instalado desde 2019) con detectores a 145 y 220 GHz; LSPE-STRIP (liderado desde la Universidad de Milán, a instalar en 2024) con detectores a 43 y 90 GHz; y TMS (liderado por el IAC), un espectrómetro de microondas en el rango 10-20 GHz que complementará a QUIJOTE, extendiendo sus objetivos científicos al estudio de las distorsiones espectrales. En su conjunto, el CMBLab será uno de los observatorios de FCM con mayor cobertura de frecuencia del mundo, y actualmente, el único en funcionamiento en el hemisferio norte.

PERSPECTIVA FUTURA PARA PRÓXIMA DÉCADA: LiteBIRD

Además de los retos observacionales que se mencionaron anteriormente (requisito sobre altos niveles de sensibilidad y corrección de contaminantes galácticos), las observaciones desde Tierra se ven fuertemente afectadas por la contaminación de la atmósfera, que no sólo produce extinción de los fotones de FCM sino también emisión en los rangos de radio y microondas. Este efecto aumenta gradualmente con la frecuencia debido al vapor de agua. Además existen bandas alrededor de 60, 120 y 180 GHz donde se producen transiciones de las moléculas de agua y del oxígeno donde la opacidad atmosférica es tan alta que es imposible realizar observaciones incluso desde los lugares más altos y secos de la Tierra. La mayoría de los experimentos que han observado el FCM desde Tierra se han centrado en la medida de las anisotropías en escalas angulares relativamente pequeñas, cubriendo regiones de cielo de algunas decenas de grados cuadrados como mucho. Estas observaciones han medido el espectro de potencias del FCM por encima del primer pico acústico, que corresponde a escalas de aproximadamente un grado, donde las fluctuaciones del FCM tienen mayor amplitud. El cubrimiento de regiones de cielo mayores desde Tierra, especialmente en frecuencias altas (por encima de 100 GHz, donde la contaminación debida al vapor de agua aumenta significativamente), supone un reto importante debido al efecto nocivo introducido por las inhomogeneidades en la distribución espacial del vapor de agua atmosférico. Por ello, la medida del espectro de potencias del FCM en todo el rango de escalas angulares (desde las escalas más grandes) requiere normalmente recurrir a misiones espaciales. El satélite COBE (1989-1993) fue el primero en medir las anisotropías en temperatura del FCM. Posteriormente las misiones WMAP (2001-2009) y Planck (2009-2014) refinaron estas medidas, alcanzando mayor sensibilidad y resolución angular.

En el caso de la detección de los modos B, poder medir de forma fidedigna escalas de mayor tamaño es incluso más importante. Una ventaja en este caso es que se sabe que la atmósfera emite emisión no polarizada (o con una polarización muy baja). Sin embargo, diferentes efectos sistemáticos de carácter instrumental, si no son bien controlados, pueden inducir polarización sobre una señal intrínsecamente no polarizada dando lugar a una

contaminación en las medidas. En este caso además observaciones desde el espacio tienen la ventaja añadida de poder medir un amplio rango de frecuencias, incluso en las bandas donde es imposible realizar observaciones desde Tierra, lo que es importante en este caso para poder medir internamente el espectro de los contaminantes galácticos (emisión sincrotrón y emisión del polvo térmico) con mayor precisión. Actualmente la única misión aceptada y en desarrollo para la medida del FCM en polarización es LiteBIRD (*Lite satellite for the study of B-mode polarization and inflation from cosmic background radiation detection*), liderada por JAXA (agencia espacial de Japón) y apoyada por un consorcio internacional donde también participan Europa, Canadá y EEUU. En particular el Consorcio Europeo, en el que España participa, es el responsable de la construcción de los dos telescopios de media y alta frecuencia, que junto con el telescopio de baja frecuencia que construye Japón conforman los tres telescopios de la misión. La misión actualmente se encuentra en fase A y tiene fecha prevista de lanzamiento a final de esta década.

LiteBIRD tiene como objetivo alcanzar una sensibilidad suficiente para mejorar las cotas actuales sobre la señal de modos B en un factor 50, logrando una medida o de lo contrario descartando diversos modelos inflacionarios que predicen una señal con amplitud dentro de este rango. Para ello realizará observaciones durante 3 años desde el segundo punto de Lagrange, con un total de 4500 detectores enfriados hasta una temperatura de 100 mK, y operando en 15 bandas de frecuencia entre 40 y 400 GHz. Este amplio rango espectral debería permitir caracterizar con el nivel de precisión necesario la polarización de la emisión de polvo térmico. Para la medida del sincrotrón se combinarán los datos de LiteBIRD con medidas a menor frecuencia desde Tierra con QUIJOTE y otros experimentos. Alcanzar el nivel de sensibilidad necesario para cumplir los objetivos científicos de la misión, además de un gran número de detectores, requiere un control de los diferentes efectos sistemáticos hasta un nivel nunca antes alcanzado. Entre ellos se encuentra el control de las fluctuaciones de ganancia en las etapas criogénicas, lo cual requiere tener un control sobre las inestabilidades de temperatura en el plano focal a un nivel inferior del micro-kelvin. Precisamente España, dentro del consorcio europeo, lidera el diseño y desarrollo de un sistema de medida y control de la temperatura que logre este objetivo.

En resumen, en los próximos años veremos un avance espectacular en nuestra comprensión de la emisión del cielo en microondas, con el objetivo último de comprender los procesos físicos que tuvieron lugar durante la inflación. En esta década, experimentos desde Tierra como los descritos en el CMBLab, o misiones espaciales como LiteBIRD en la próxima década, nos permitirán poner a prueba nuestra comprensión última de nuestro paradigma cosmológico, proporcionando la posibilidad de verificar nuestras teorías de física fundamental en escalas de energía que no son accesibles por otros medios.

PRIMEROS RESULTADOS DEL LST-1 DE CTA

El telescopio LST-1 (*Large-Sized Telescope*, ver figura 1), inaugurado en octubre de 2018 en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) [1, 2], es el primero del futuro observatorio norte de CTA (*Cherenkov Telescope Array*, [3]). Una vez completado, CTA-Norte será, junto con su homólogo CTA-Sur, en el observatorio de ESO - Cerro Paranal, el instrumento astronómico más sensible en la banda gamma de muy alta energía (VHE, $E_\gamma > 20$ GeV) en las próximas décadas.



Abelardo Moralejo
moralejo@ifae.es

Rubén López-Coto
rlopezcoto@iaa.es

Daniel Morcuende
dmorcuen@ucm.es

En nombre del Proyecto LST de CTA

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

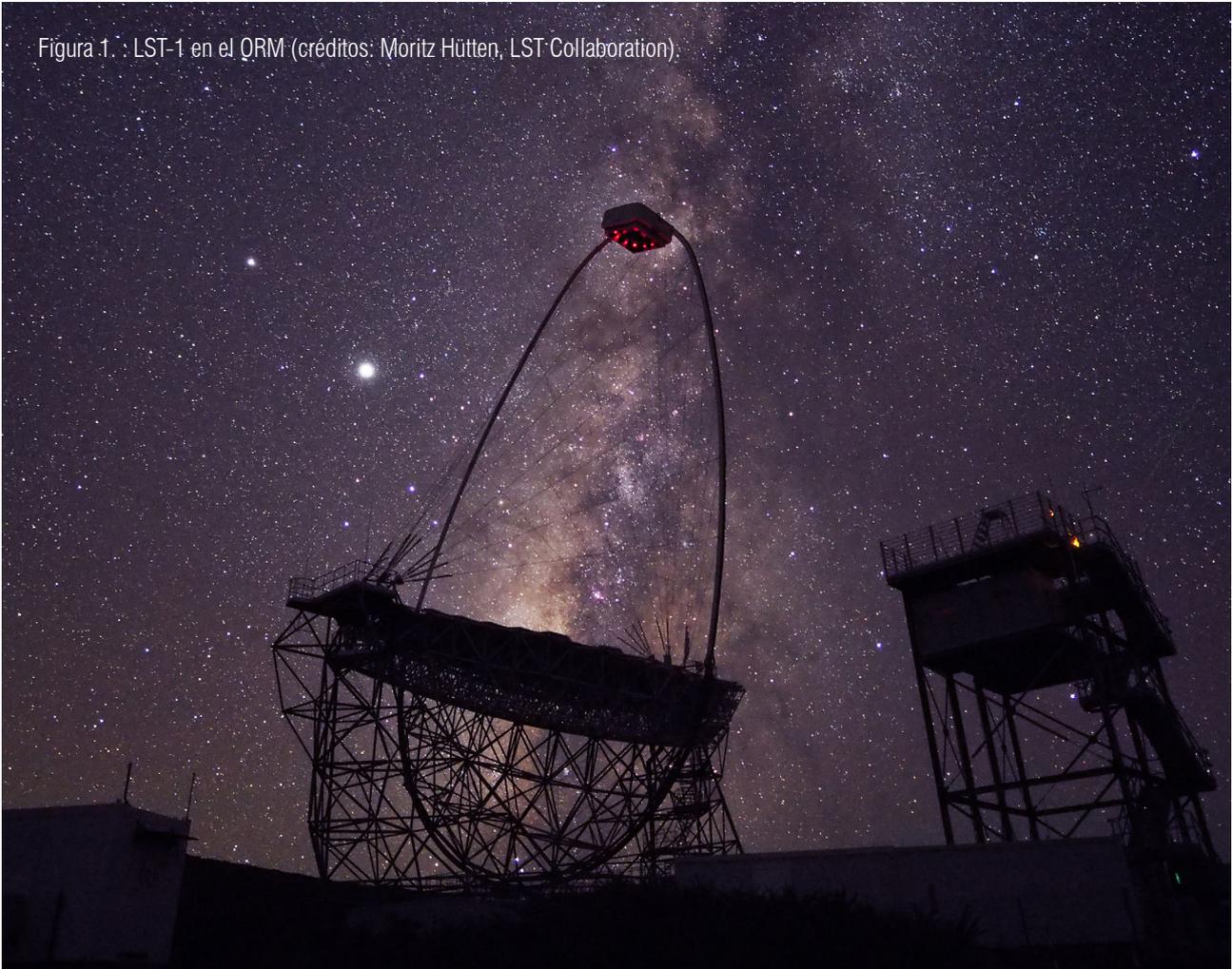
Los LSTs son telescopios Cherenkov atmosféricos (*Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes* o "IACTs"). Estos instrumentos utilizan grandes espejos parabólicos y cámaras equipadas con fotomultiplicadores para detectar el breve destello de luz Cherenkov producido por la cascada de partículas ultra-relativistas inducida por la absorción en la atmósfera de un fotón de muy alta energía. Esta "cascada atmosférica" es un proceso multiplicativo iniciado y alimentado por la creación de pares electrón-positrón, y de fotones gamma secundarios generados por *bremsstrahlung* (véase la figura 2). Un IACT es capaz de registrar imágenes de la cascada en luz Cherenkov, en el rango de longitud de onda visible y ultravioleta cercano. El análisis de las imágenes permite reconstruir tanto la dirección del fotón primario como su energía. Para un fotón VHE de incidencia vertical, la mayor parte de la luz Cherenkov se distribuye en el nivel de observación en un disco de unos 120 metros de radio, pero dependiendo de su energía, la detección es posible incluso a centenares de metros de distancia del eje de la cascada. La atmósfera actúa por tanto como un gigantesco calorímetro, con una profundidad de ≈ 22 longitudes de radiación (a la altura del ORM), y un área efectiva de detección del orden de 10^5 m². En contraste, los telescopios gamma espaciales, como *Fermi-LAT*, tienen áreas efectivas de apenas un metro cuadrado, lo que limita fuertemente su sensibilidad en la banda de muy alta energía.

En su primera fase (o "configuración alpha") CTA-Norte constará de cuatro LSTs (equipados con espejos de 23 m de diámetro) y nueve MSTs (*Medium-Sized Telescopes*, de 12 m). La comunidad española ha participado desde su inicio en el proyecto CTA, con gran implicación en el diseño y construcción de los LSTs, sucesores naturales de los telescopios MAGIC que operan en el ORM desde hace veinte años.

ANÁLISIS DE LOS DATOS

En condiciones ideales de observación (con la luna por debajo del horizonte y buena calidad de la atmósfera) el ritmo de detección de cascadas de LST-1 es de aproximadamente 7000 por segundo. Prácticamente todas ellas son cascadas iniciadas en la atmósfera por rayos cósmicos cargados: un flujo isótropo de protones, partículas alfa, y otros

Figura 1. : LST-1 en el QRM (créditos: Moritz Hütten, LST Collaboration)



núcleos de muy alta energía que constituyen la principal fuente de ruido para un IACT. La identificación de las escasas cascadas iniciadas por fotones supone el mayor reto en el análisis de las observaciones. La reconstrucción de las imágenes se realiza con la ayuda de una detallada simulación Monte Carlo (MC) del desarrollo de las cascadas atmosféricas, la producción de luz Cherenkov, y de su detección por parte del telescopio. El análisis estándar de los datos de LST-1 utiliza los sucesos simulados para entrenar un método de aprendizaje automático supervisado que clasifica las imágenes, según su forma e intensidad, en una escala de 0 a 1 (el llamado parámetro “*gammaness*”). El valor de *gammaness* asignado a

una imagen será mayor cuanto más similar sea la imagen a la esperada, según la simulación, para una cascada iniciada por un fotón. Si bien no puede identificarse con certeza la naturaleza de cada cascada individual, la selección de los sucesos con un cierto valor mínimo de *gammaness* siempre conservará más fotones que sucesos de fondo.

La reconstrucción de la dirección y de la energía del fotón primario utiliza también métodos de aprendizaje automático (en su variante de regresión) entrenados sobre simulaciones. Para cada suceso registrado por LST-1, obtenemos por tanto estimaciones de su dirección y su energía, y un valor de *gammaness*.

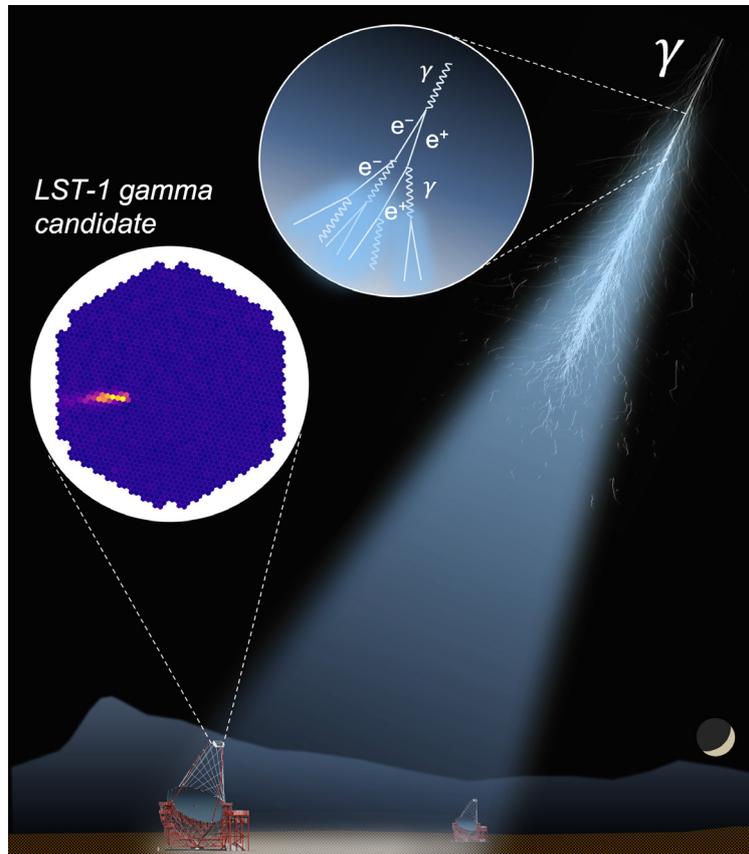
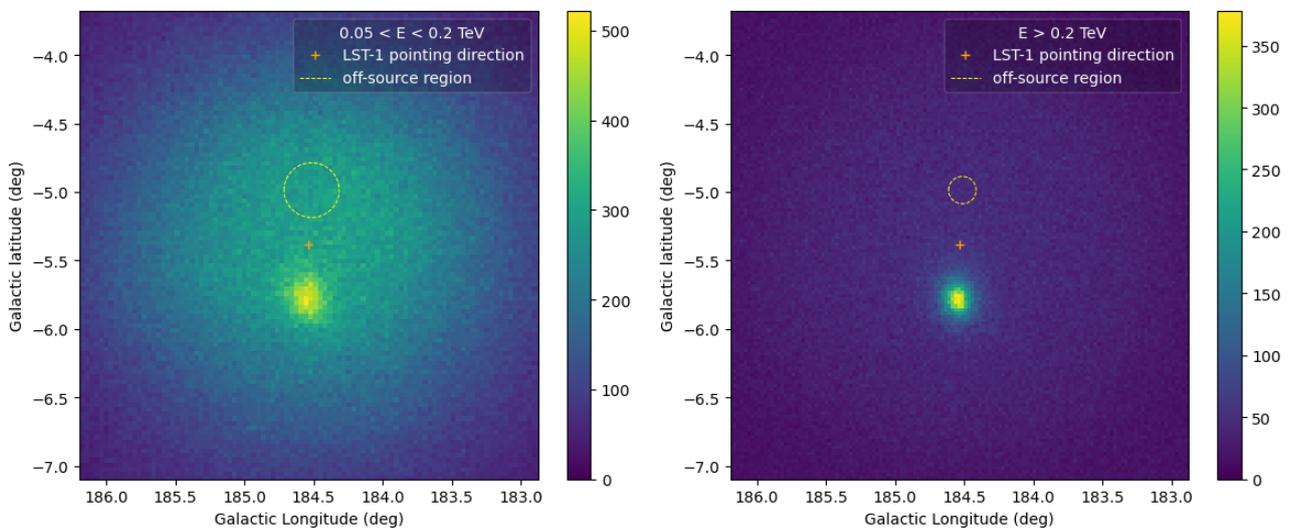


Figura 2. Principio de funcionamiento de un IACT.

Figura 3. Imágenes de la región de la nebulosa del Cangrejo en dos rangos de energía, obtenidas con LST-1. El fondo difuso es debido fundamentalmente a cascadas iniciadas por protones de la radiación cósmica. La escala de colores indica el número de sucesos reconstruidos en cada bin. Se muestran las regiones de control para la estimación del fondo difuso.



Energía [TeV]	0.03	0.1	1	10
Área efectiva [m ²]	1.5×10 ⁴	6.5×10 ⁴	2.0×10 ⁵	2.5×10 ⁵
Resolución angular [grados]	0.40	0.25	0.17	0.18
Resolución energética $\Delta E/E$	0.50	0.35	0.19	0.20

Tabla 1. Parámetros de funcionamiento del telescopio LST-1 en función de la energía.

Dado que no es posible eliminar completamente el fondo isótopo de rayos cósmicos, para obtener el número de fotones procedentes de una fuente gamma utilizamos fotometría de apertura, analizando el conteo de sucesos alrededor de una dirección situada a la misma distancia del centro del campo de visión. La figura 3 muestra la distribución de las cascadas reconstruidas por LST-1 en torno a la nebulosa del Cangrejo en dos rangos de energía, y las regiones utilizadas para la estimación del fondo. Puede apreciarse cómo el exceso debido a la emisión gamma de la nebulosa es más nítido (y más compacto) a mayor energía, como consecuencia de la mejor reconstrucción de las cascadas.

VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LST-1

La correcta simulación del telescopio y del desarrollo de las cascadas en la atmósfera es esencial para obtener resultados fiables. Hemos verificado la validez de la simulación utilizando dos métodos independientes. El primero consiste en el análisis de los llamados “anillos de muones”, imágenes producidas por muones de la radiación cósmica secundaria. Cada muon aislado cuya trayectoria intercepta el espejo del telescopio produce una cantidad de luz bien definida, predecible a partir de la posición y geometría del anillo. LST-1 registra cientos de estos sucesos por minuto, lo que nos permite estudiar la estabilidad del telescopio en cuanto a su eficiencia de captación de luz, así como ajustar el valor de dicha eficiencia en la simulación MC. El otro método consiste en utilizar las observaciones de la nebulosa del Cangrejo, la candela estándar en la banda VHE, y obtener a partir de ellas distribuciones de distintos parámetros de imagen para las

cascadas iniciadas por fotones. Las distribuciones obtenidas con LST-1 (por ejemplo, la del parámetro *gammaness* y su evolución con la intensidad de las imágenes) son perfectamente compatibles con las correspondientes a los fotones de la simulación.

Una vez validada, la simulación MC se utiliza para calcular las funciones de respuesta del telescopio (entre ellas el área efectiva en función de la energía), que permiten obtener, a partir del exceso estimado de fotones gamma, el espectro VHE de la fuente observada. También nos proporciona los principales parámetros de funcionamiento de LST-1. El umbral de energía de LST-1 es de alrededor de 20 GeV, que con el análisis actual se incrementa hasta ≈ 30 GeV después de la selección de candidatos gamma. El valor óptimo de la sensibilidad (mínimo flujo de rayos gamma detectable de una fuente puntual) es de un 1.1% del flujo de la nebulosa del Cangrejo para $E > 250$ GeV en 50 horas de observación (12.4% en 0.5 horas). La tabla 1 muestra otros parámetros de LST-1 derivados de las funciones de respuesta.

En la configuración final de CTA-Norte cada cascada será reconstruida estereoscópicamente por dos o más telescopios (LSTs y MSTs), lo que mejorará enormemente la resolución angular y energética del sistema, así como la capacidad de identificar y suprimir el fondo de rayos cósmicos. Los resultados aquí presentados corresponden al funcionamiento del primer LST operado individualmente, en modo “monoscópico”. Pese a las limitaciones que este modo de operación impone, LST-1 es ya un instrumento competitivo, y ha comenzado a desarrollar su programa científico.

PRIMEROS RESULTADOS OBTENIDOS CON LA NEBULOSA Y EL PÚLSAR DEL CANGREJO

LST-1 inició su primera fase de explotación científica en noviembre de 2019, y ha realizado desde entonces observaciones de manera regular de decenas de fuentes. La fuente astrofísica más observada ha sido la nebulosa del Cangrejo, cuyo espectro de emisión de rayos gamma se ha caracterizado durante varias décadas por instrumentos que observan el cielo en este rango de energía, resultando ser la fuente con emisión estable (dentro de las incertidumbres sistemáticas de los telescopios) más brillante en rayos gamma VHE, por lo que se la considera una fuente de calibración. Por ello, como parte de la verificación del correcto funcionamiento de LST-1, también hemos obtenido el espectro y la curva de luz de la nebulosa del Cangrejo (figuras 4 y 5).

El cálculo del flujo de fotones gamma se basa en fotometría de apertura, como se ha explicado anteriormente (véase figura 3). Teniendo en cuenta las funciones de respuesta del telescopio y asumiendo que el espectro en energía se puede modelar mediante una parábola logarítmica se calculan los parámetros

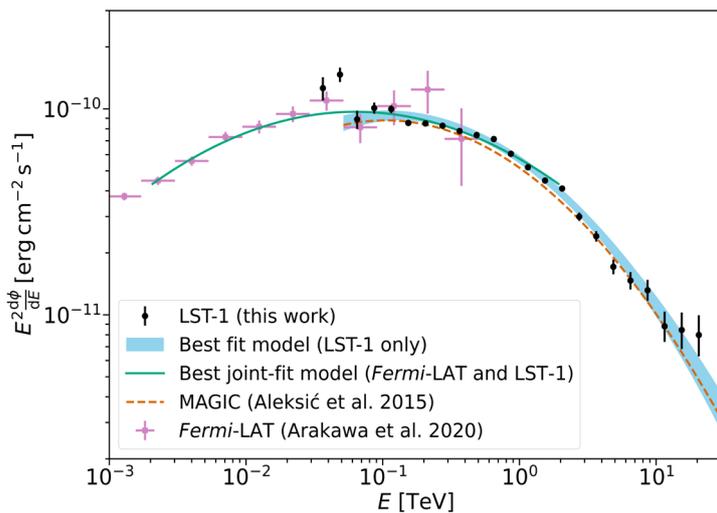


Figura 4. Espectro de la nebulosa del Cangrejo obtenido a partir de observaciones realizadas con el LST-1. La banda azul representa el modelo obtenido ajustando solamente con los datos del LST-1. Como referencia se muestra el espectro obtenido por los telescopios MAGIC y por el telescopio espacial *Fermi*-LAT. La línea continua representa el ajuste conjunto de los datos del LST-1 y *Fermi*-LAT entre 2 GeV y 2 TeV.

espectrales. El resultado obtenido con los datos de LST-1 es comparable al reportado por la colaboración MAGIC en el mismo rango de energía (dentro de un 10% de error sistemático en la normalización del flujo en ambos instrumentos, valor típico en estos telescopios). A bajas energías el espectro obtenido con LST-1 conecta perfectamente con la parte más energética del espectro medido por *Fermi*-LAT como muestra el ajuste conjunto de los datos de ambos instrumentos. Cerca del umbral de energía de LST-1, es especialmente notable el efecto de la incertidumbre sistemática en la determinación del fondo a sustraer para el cálculo del espectro. Una pequeña variación porcentual en el factor de normalización entre las regiones del campo de visión usadas para calcular la señal de fotones provenientes de la fuente y el fondo da lugar a un cambio en el flujo de los puntos espectrales a bajas energías significativamente mayor que la incertidumbre estadística mostrada en la figura 4. Esto explica la aparente incompatibilidad de los puntos espectrales de baja energía y muestra la limitación de un telescopio Cherenkov operando en modo monoscópico para discriminar eventos de señal y fondo cerca de su umbral.

El flujo de rayos gamma de $E \geq 1$ GeV de la nebulosa del Cangrejo, con un máximo de emisión alrededor de 60 GeV, se explica generalmente como resultado del mecanismo SSC (*Synchrotron-Self-Compton*). La nebulosa contiene una población de electrones y positrones de muy alta energía que emiten radiación sincrotrón en un amplio rango de frecuencias (desde ondas de radio a rayos gamma de ≈ 1 GeV). Los fotones sincrotrón pueden interactuar por efecto Compton inverso con esa misma población de electrones y positrones, adquiriendo energías mucho mayores, de hasta 1 PeV [4]. Para comprobar la estabilidad del flujo de fotones VHE de la nebulosa del Cangrejo a lo largo de las observaciones tenidas en cuenta en este trabajo (realizadas entre noviembre de 2020 y marzo de 2022), hemos obtenido la curva de luz integrando el flujo observado por encima de 100 GeV en intervalos temporales de un día (véase la figura 5). La curva de luz a lo largo de todas las observaciones es compatible con un flujo constante si se tiene en cuenta una incertidumbre sistemática del 6% en la determinación de cada uno de los flujos diarios calculados (incertidumbre fundamentalmente debida a pequeñas variaciones en las condiciones de la atmósfera a lo largo del periodo de observación).

Por último, también hemos detectado la emisión pulsada proveniente del púlsar que se encuentra en la parte central de la nebulosa del Cangrejo. La resolución angular de los telescopios Cherenkov no permite resolver el púlsar, pero podemos estudiar el perfil temporal del exceso observado para encontrar la componente pulsada.

El periodo de rotación de la estrella de neutrones resultante de la explosión de la supernova SN1054 que dio lugar a la nebulosa es de 33 ms. La emisión del púlsar se concentra en dos pulsos bien diferenciados, P1 y P2, detectados claramente con LST-1 (véase la figura 6). Es importante destacar que la detección de la emisión pulsada de fotones VHE es prueba del bajo umbral de energía alcanzado por LST-1, ya que la emisión del púlsar se concentra a menores energías que la de la nebulosa antes descrita.

OTROS RESULTADOS CIENTÍFICOS

En esta primera etapa de su programa científico, LST-1 ha realizado observaciones de otras fuentes astrofísicas. A continuación, enumeramos algunos de los principales resultados obtenidos.

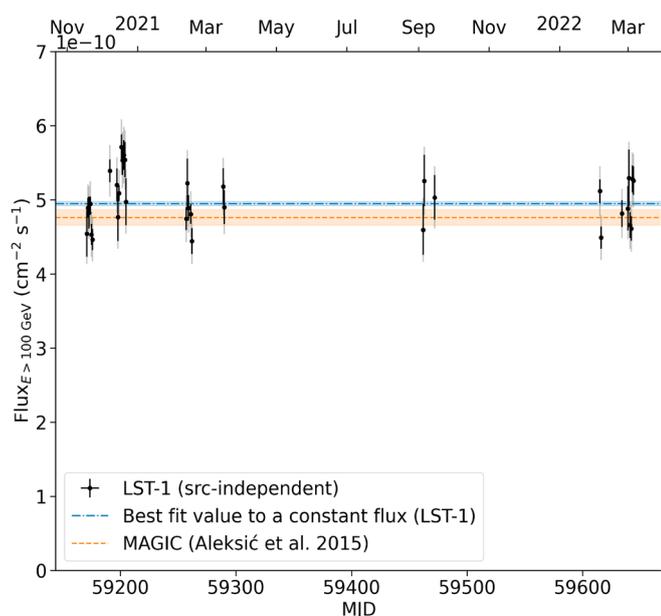


Figura 5. Curva de luz de la nebulosa del Cangrejo obtenida por LST-1 para fotones de energía mayor de 100 GeV y usando intervalos temporales de un día.

RS Ophiuchi

RS Ophiuchi (RS Oph) es una nova recurrente situada en la constelación de Ophiuchus que experimenta erupciones aproximadamente cada 15 años. La más reciente tuvo lugar el 8 de agosto de 2021, una erupción que fue vista en longitudes de onda desde el radio hasta los rayos gamma de muy alta energía. Esta fue la primera ocasión en la que una nova fue detectada en el rango energético por encima de las decenas de GeV, y junto a MAGIC y H.E.S.S., dos de los sistemas punteros en el mundo operando en este rango energético, LST-1 fue capaz de seguir el fenómeno transitorio y detectar emisión gamma de alta energía proveniente de RS Oph. Junto a los resultados de MAGIC y H.E.S.S. y del telescopio espacial *Fermi*-LAT, los resultados de LST-1 revelan un escenario en el que las ondas de choque de la nova aceleran protones hasta energías ultrarelativistas y son el origen de la emisión en rayos gamma de muy alta energía.

Fuente LHAASO J2108+5157

LHAASO J2108+5157 es una de las fuentes sin identificar del conjunto de fuentes galácticas detectadas por LHAASO hasta energías más allá de los PeV, y la única que no tiene asociada una contrapartida a energías más bajas. Este objeto, que podría tener una extensión no despreciable a energías del orden del TeV, fue observado por LST-1 durante 49 horas en buenas condiciones. A pesar de no detectarla a energías de TeV, las observaciones de LST-1 (véase la figura 7) imponen límites que, junto al estudio de los datos obtenidos en otras bandas, constriñen los parámetros de los diferentes modelos que explican la emisión de esta fuente [5].

El Centro Galáctico

El telescopio LST-1 también está llevando a cabo un monitoreo del Centro Galáctico (observable a alto ángulo cenital). A pesar de que la emisión gamma de la fuente central de nuestra galaxia es ya conocida y aparentemente estable a lo largo de los años, la observación de esta región en la banda gamma es de gran interés, por ejemplo en la determinación de la máxima energía de los protones acelerados alrededor del Centro Galáctico (a través de la observación de la emisión difusa resultante de sus interacciones), o en la búsqueda de indicaciones de aniquilación o desintegración de materia oscura.

BL Lacertae

El 11 de julio de 2021 LST-1 observó la galaxia activa BL Lacertae (BL Lac), registrando un flujo de rayos gamma procedente de su núcleo significativamente superior al habitual para este objeto [6]. El seguimiento a lo largo de las semanas siguientes mostró picos de emisión varios órdenes de magnitud superiores a los de su estado base, alcanzando a principios de agosto un flujo alrededor de cuatro veces el de la nebulosa del Cangrejo por debajo de 100 GeV. La variabilidad detectada fue tan rápida que se pudo trazar hasta escalas temporales por debajo de las horas.

Otros núcleos activos de galaxias

Uno de los objetivos principales de LST son las fuentes gamma situadas a distancias cosmológicas, cuyo brillo en la banda VHE se ve atenuado por la interacción de los fotones gamma con la luz de fondo extragaláctica (a través de la producción de pares $e^+ - e^-$). Si además estas fuentes presentan fenómenos transitorios de variabilidad rápida, como en el caso de BL Lac, la única manera de estudiarlas es a través del uso de IACTs (con áreas efectivas mucho mayores que los telescopios espaciales). Entre 2020 y 2023, hemos detectado con LST-1 varios núcleos activos de galaxias como por ejemplo Mrk 421, Mrk 501, 1ES 1959+650, 1ES 0647+250 y PG 1553+113. Las curvas de luz de estas fuentes se han reconstruido hasta energías de las decenas de los GeV, muy cercanas al umbral de energía de los LSTs. En estos momentos estamos llevando a cabo estudios de variabilidad y de monitoreo a largo plazo de las mismas.

PERSPECTIVAS

El telescopio LST-1 continuará funcionando en modo monoscópico durante aproximadamente dos años más, mientras los siguientes telescopios LSTs y MSTs que formarán parte de CTA-Norte se ponen en funcionamiento. Durante este periodo, el primer LST seguirá observando el cielo VHE visible desde el hemisferio norte. Uno de los objetivos claves en su programa científico es la detección de fenómenos transitorios como, por ejemplo, la emisión de fotones VHE provenientes de estallidos de rayos gamma. El rápido apuntado de LST-1 en caso de alertas de otros telescopios, su gran área de colección de luz y su bajo umbral de energía hacen que este ins-

trumento sea único para estudiar este tipo de fuentes esporádicas, cuyos mecanismos de emisión son aún desconocidos. LST-1 tiene un programa de seguimiento de sucesos transitorios en un marco de astronomía multi-mensajero que depende de alertas emitidas por otros instrumentos en diferentes longitudes de onda, así como de telescopios de ondas gravitacionales y neutrinos.

Parte de los esfuerzos de LST-1 también se centrarán en la observación de púlsares, para los cuales este tipo de telescopios es idóneo debido a su sensibilidad a energías del orden de unas pocas decenas de GeV, y a los espectros extremadamente *blandos* de estas fuentes. Por este motivo se espera que LST-1 detecte la emisión pulsada en VHE de púlsares como Geminga y Dragonfly, necesitando menor tiempo de observación que los IACTs actuales.

Por último, LST-1 explotará la posibilidad de realizar observaciones conjuntas con los telescopios MAGIC: la situación de LST-1, junto con su mayor tamaño y campo de visión respecto a MAGIC, hace que la práctica totalidad de las cascadas que activan MAGIC sean visibles también para LST-1. Las observaciones simultáneas permiten por tanto tener un sistema estereoscópico de tres telescopios, con mayor sensibilidad que MAGIC y LST-1 por separado. Ya hemos llevado a cabo con éxito las primeras pruebas de este modo de operación, que utilizaremos frecuentemente hasta que los próximos telescopios de CTA-Norte entren en funcionamiento a lo largo de 2024 y 2025.

REFERENCIAS

1. Boletín de la SEA, número 40, verano 2019
2. <https://www.lst1.iac.es/>
3. <https://www.cta-observatory.org/>
4. *PeV gamma-ray emission from the Crab Nebula*, Cao et al, Science 373 (2021)
5. Abe, S. et al., *Multiwavelength study of the galactic PeVatron candidate LHAASO J2108+5157*, A&A 673, A75 (2023)
6. <https://astronomerstelegram.org/?read=14783>

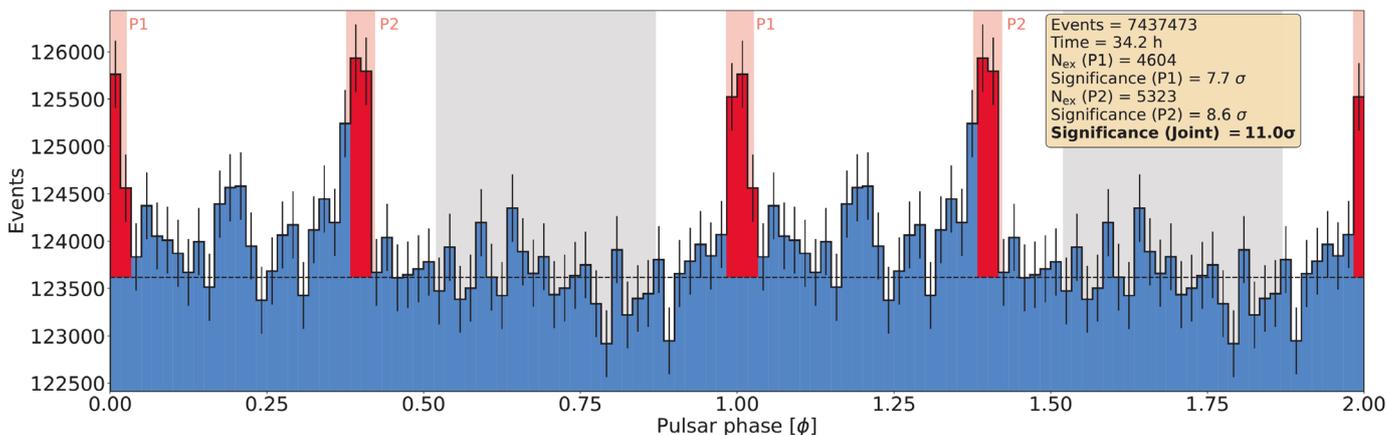


Figura 6. Faseograma del púlsar del Cangrejo.

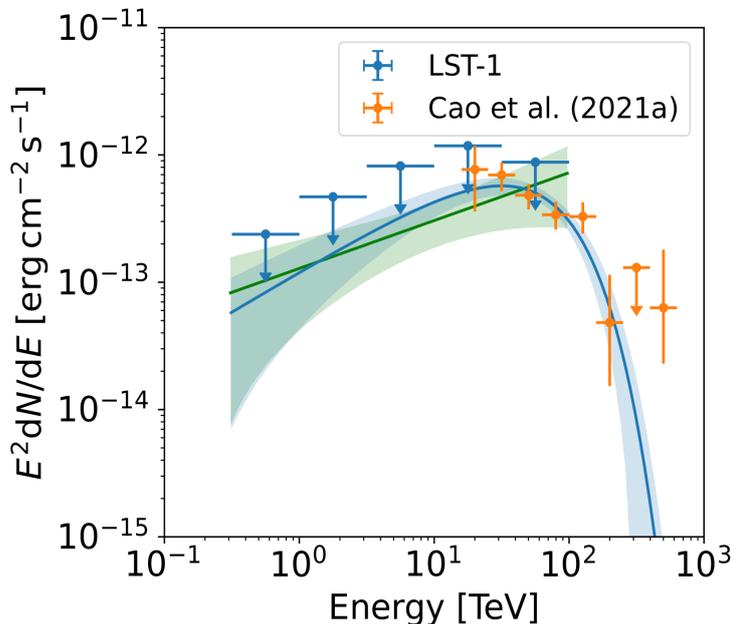


Figura 7. Espectro de la emisión de fotones VHE proveniente de LHAASO J2108+5157 medido por LST-1 (límites superiores) y LHAASO (Cao et al., 2021a).

«La velocidad de apuntado de LST-1, su gran área de colección de luz y su bajo umbral de energía hacen de él un instrumento único para el estudio de fenómenos transitorios a distancias cosmológicas, como los estallidos de rayos gamma.»

¿ESTÁ EL PARADIGMA Λ CDM EN PELIGRO

No es la única forma, pero muy probablemente es uno de los métodos más potentes para estudiar las primeras fases de la evolución de nuestro Universo, incluso más allá de la época de la recombinación. Lo afirmamos desde nuestro punto de vista subjetivo como entidades basadas en la existencia de bariones, estrellas, y planetas, y contando además con que somos astrofísicos extragalácticos. Nos referimos a cómo se formaron las primeras estrellas y galaxias, un tema que ahora está renaciendo gracias a los primeros datos proporcionados por el telescopio espacial más potente jamás construido, el JWST.



Pablo G. Pérez-González
Centro de Astrobiología (CAB), CSIC-INTA
pgperez@cab.inta-csic.es

Mauro Stefanon
Universitat de València
mauro.stefanon@uv.es

El 12 de julio de 2022, JWST (usaremos en este artículo solo las siglas del telescopio, siguiendo la política de AAS y RAS) distribuyó los primeros datos públicos a todos los astrofísicos del mundo, después de completar exitosamente un período de 6 meses de puesta a punto. Este fue el pistoletazo de salida de una carrera por descubrir nuevas galaxias a alto desplazamiento al rojo, más en concreto explorando los primeros 500 millones de años después del Big Bang ($z \geq 10$), o incluso los primeros 250 Myr ($z \geq 15$). Este objetivo se está abordando a través de estudios fotométricos y espectroscópicos profundos realizados por todos los instrumentos JWST, desde las longitudes de onda más azules analizadas por NIRCcam, las más rojas analizadas por MIRI, así como aprovechando las prestaciones espectroscópicas y espectrofotométricas de NIRSpec y NIRISS. Describimos los resultados en estos primeros once meses en este artículo.

Las llamadas “primeras observaciones públicas” (ERO por sus siglas en inglés, *Early Release Observations*) mostraron el potencial único de JWST desde esa primera publicación de datos en julio de 2022. Además de las imágenes ultraprofundas tomadas para el cúmulo MACS0723, que mejoraron las observaciones de Hubble en profundidad, y especialmente de Spitzer en resolución espacial en el infrarrojo medio, los espectros de galaxias de alto desplazamiento al rojo fueron el conjunto de datos más significativo y único proporcionado por JWST. Solo cuatro días después de la publicación de los datos ERO, el 18 de julio, Carnall et al. (2023) presentaron desplazamientos al rojo espectroscópicos obtenidos con líneas de emisión para 10 fuentes, incluidas cinco a $5 < z < 9$, todas con líneas de emisión [OIII] muy fuertes y muy bien detectadas, e incluso detecciones de emisión H δ .

Antes de que JWST empezara a proporcionar datos, la mayor parte de la información sobre las propiedades físicas de las fuentes de alto desplazamiento al rojo provenía del análisis de fotometría de banda ancha (equivalente a una resolución espectral de $R \sim 5$). Solo existían unos pocos espectros, en su mayoría ruidosos, para fuentes a $z > 6$, obtenidos con espectrógrafos de infrarrojo cercano montados en telescopios terrestres de 8-10 metros. Estos estudios se centraron en la emisión Lyman- α y líneas metálicas en el UV (p. e., Stark et al. 2017). De hecho, a estos desplazamientos hacia el rojo, el rango óptico en reposo se desplaza

POR LOS PRIMEROS RESULTADOS DE JWST?

a $\lambda \geq 3 \mu\text{m}$, fuera del alcance de HST y de los espectrógrafos terrestres. El acceso a este régimen de longitud de onda solo estaba disponible con profundidades suficientes para explorar el Universo lejano a través de imágenes de banda ancha a $3.6 \mu\text{m}$ y $4.5 \mu\text{m}$ proporcionadas por Spitzer/IRAC. Antes del lanzamiento de JWST, sabíamos de la presencia de líneas de emisión prominentes que parecían afectar la emisión en las citadas bandas. Sin embargo, la sensibilidad limitada (hasta magnitud 27 como mucho) y la relativamente baja resolución espacial (PSF FWHM $\sim 1.8''$) de IRAC nos impedían conocer en detalle las propiedades de estas galaxias a alto desplazamiento al rojo. Fue normal entonces que todos nos quedáramos impresionados por el salto en la calidad y el rango espectral cubierto por NIRSpec en esos datos ERO!

A las ERO pronto se unieron las primeras observaciones proporcionadas por exploraciones públicas como CEERS y GLASS, dos proyectos denominados Early Release Science (ERS), planeados para proporcionar datos públicos y mostrar las prestaciones de JWST a toda la comunidad en los primeros seis meses de la misión científica. Con todas estas observaciones, un gran número de artículos aparecieron en las siguientes semanas. Llegado este momento queremos hacer un inciso para mencionar que muchos de nosotros, antes del lanzamiento de JWST, considerábamos la disponibilidad pública de los datos de JWST desde día 1 como una política muy positiva. No obstante, debemos decir que la gran competencia entre equipos fue sorprendente, poco saludable en cierta medida, e incluso preocupante. De hecho, las reducciones de datos disponibles en el archivo de JWST/MAST estaban lejos de ser óptimas. En esas primeras semanas de la misión científica, algunos de los equipos con amplia experiencia previa en el uso de datos simulados aún luchaban por mejorar la calidad de las calibraciones (incluidos los errores sistemáticos en la calibración fotométrica absoluta de hasta varias décimas de magnitud, Boyer et al. 2022). Sin embargo, al mismo tiempo otros equipos se apresuraban a publicar, y ya no hablamos de publicar en la revista con árbitro, sino a publicar en artículos rápidamente colgados en astro-ph o incluso en Twitter. No hace falta decir que esta actitud frenética implicaba la presencia de fallos potencialmente significativos en el análisis e interpretación de los nuevos datos que empezaban a llegar.

Centrándonos ahora en los resultados científicos, algo comenzó a surgir como un resultado sorprendente y robusto. Con observaciones como las proporcionadas por el programa CEERS, que se planeó para alcanzar magnitud 29 (AB) en 7 filtros que abarcan desde $1.15 \mu\text{m}$ hasta $4.4 \mu\text{m}$ en 10 apuntados NIRC2, esperábamos (bastante) menos de una decena de galaxias a $z > 9$, considerando que CEERS muestrea la población brillante ($L > L^*$). Sin embargo, artículos como Naidu et al. (2022), Harikane et al. (2022), Castellano et al. (2022), Donnan et al. (2022), Bouwens et al. (2022a), Yang et al. (2022) y Finkelstein et al. (2022) proporcionaron candidatas muy prometedoras de galaxias a $z \sim 10$ y $z \sim 12$, incluso llegando a $z \sim 16$ o $z \sim 20$. Estos equipos independientes analizaron los mismos conjuntos de datos (eran públicos) y encontraron muestras de 1 a 25 candidatas a $z > 8$ (remarcamos la palabra candidata, véase más abajo), con un típico (y preocupante) nivel del 20% de objetos en común entre muestras. Incluso con las grandes incertidumbres de estos primeros artículos, todos los trabajos coincidieron en que JWST estaba descubriendo muchas más candidatas a galaxias a alto desplazamiento al rojo de lo esperado en base a datos y simulaciones pre-JWST. La diferencia no era pequeña, se descubrían al menos el doble y típicamente 5 veces más candidatas robustas de las esperadas (véase, por ejemplo, la Figura 5 en Finkelstein et al. 2022). Esto sugería que las galaxias en el Universo primitivo ensamblaron su contenido estelar de manera muy eficiente.

Dos o tres meses más tarde siguieron artículos más completos, que confirmaron el resultado mencionado anteriormente, mejoraron las coincidencias entre las muestras y discutieron de manera crítica y constructiva los desafíos a los que nos enfrentábamos con los primeros datos JWST. Artículos como Bouwens et al. (2023), Finkelstein et al. (2023b) y Harikane et al. (2023) presentaron muestras combinadas extraídas de varios conjuntos de datos.

Más allá de la selección fotométrica, la confirmación espectroscópica de candidatas a galaxias a $z > 8$ es una de las prestaciones más asombrosas de JWST. A diferencia de HST, con JWST podemos seleccionar candidatas a galaxias a muy alto desplazamiento al rojo y luego abordar la confirmación espectroscópica, especialmente con el instrumento NIRSpec de la ESA, que ha contado con una importante contribución de la comunidad española.

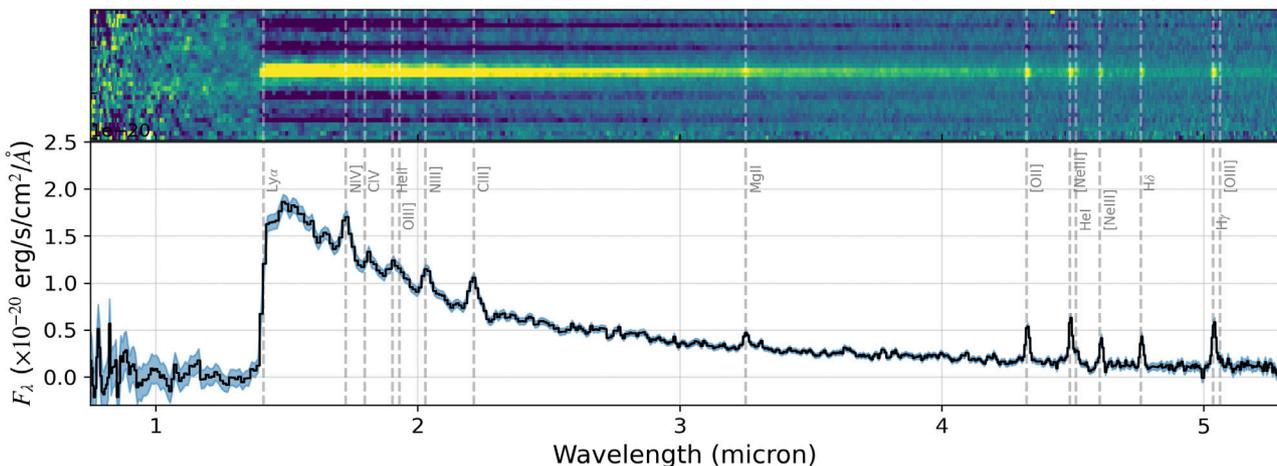
El punto de partida de esta tarea de confirmación espectroscópica consistió en el seguimiento de fuentes previamente identificadas con HST. Aunque no fue la primera, un ejemplo notable es GNz11 (Oesch et al. 2016), la galaxia más luminosa con formación estelar (al menos esta era la naturaleza asignada antes de JWST, véase Maiolino et al. 2023) con el desplazamiento al rojo más alto en la era pre-JWST. El espectro grisma de HST/WFC3 de 12 órbitas (~ 11 horas de tiempo de exposición acumulado, Oesch et al. 2016) no mostraba grandes características espectrales aparte de un salto identificado con el de Lyman. Pero los datos de JWST ahora mostraban una gran cantidad de líneas de emisión sobresaliendo por encima de un sólido continuo y su *break* (Bunker et al. 2023; Figura 1). Entre estas líneas encontramos incluso emisión Ly- α en una época que se considera cercana a la era de la preionización.

Rápidamente empezaron a aparecer más trabajos mostrando la verificación espectroscópica de fuentes descubiertas tanto por HST como ya por JWST (Curtis-Lake et al. 2023, Arrabal-Haro et al. 2023a,b, Harikane et al. 2023, Roberts-Borsani et al. 2022). La espectroscopía ha confirmado no sólo que muchas de las candidatas a $z > 8$ eran reales,

sino también ha revelado interesantes poblaciones de galaxias que podrían contaminar esas muestras, complicando la construcción de muestras robustas de galaxias primigenias. Ejemplos de tales poblaciones son “*dusty starburst*” a $z=4-6$, y fuentes con líneas de emisión súper-intensas con desplazamientos al rojo tan altos como $z \sim 7$, que cuentan con anchuras equivalentes en reposo por encima de los 1000 Angstrom (Zavala et al. 2022, Naidu et al. 2023, Pérez-González et al. 2023a, Arrabal-Haro et al. 2023a).

Si bien la espectroscopía en el infrarrojo cercano y medio de JWST podría decirse que proporciona el mayor potencial de nueva ciencia sobre el universo primitivo, la mejora en las capacidades de imagen a $3-5 \mu\text{m}$ (NIRCam) y hasta $\sim 18 \mu\text{m}$ (MIRI) en términos de sensibilidad y resolución espacial (que minimiza la contaminación fotométrica por fuentes vecinas) constituye también un recurso muy poderoso. Específicamente, esto ha permitido a la comunidad seleccionar muestras de galaxias con alto desplazamiento al rojo a partir de longitudes de onda ópticas e infrarrojas en reposo, lo que reduce significativamente los efectos de selección introducidos por la atenuación del polvo y las poblaciones estelares evolucionadas.

Figura 1. Espectro de NIRSpec de GNz11, $z=10.6$, publicado en Bunker et al. (2023). El espectro está tomado con el prisma (resolución espectral alrededor de 100) y muestra un claro break de Lyman además de múltiples líneas de hidrógeno, helio y varios metales.

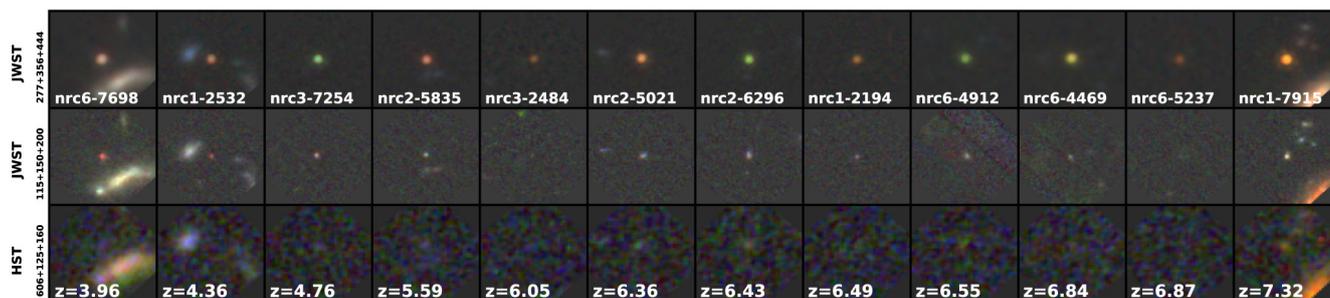


Estos tipos de objetos pueden contaminar potencialmente las muestras de galaxias con elevados desplazamientos al rojo seleccionadas a partir de grandes saltos de color. Son también, por otra parte, galaxias extremadamente interesantes en sí. Por ejemplo, se han descubierto galaxias rojas a $5 < z < 9$ que podrían ser extremadamente masivas, tal como fue presentado en artículos como Labbé et al. (2023), Barrufet et al. (2022), Rodighiero et al. (2023), Pérez González et al. (2023b; Figura 2) y Atkins et al. (2023). Estos estudios se basaron en esfuerzos previos con Spitzer (p. e., Stefanon et al. 2015; Alcalde Pampliega et al. 2019; Wang et al. 2019) que, sin embargo, carecían tanto de la sensibilidad como de la resolución espacial para determinar de manera sólida sus propiedades físicas. Actualmente todavía existe un debate intenso sobre la naturaleza de esta población de galaxias que podría presentar masas estelares extremadamente altas, incluso desafiando los modelos Λ CDM ya que no podría explicar la formación de grandes cantidades de estrellas en el Universo muy joven (véase, por ejemplo, Boylan-Kolchin 2023, Lovell et al. 2023, Haslbauer et al. 2022, pero también Mason et al. 2023, Keller et al. 2023, McCaffrey et al. 2023, Prada et al. 2023). Sin embargo, estudios recientes han cuestionado esta primera interpretación,

al menos para algunas de las fuentes, señalando la presencia potencial de poblaciones estelares extremadamente jóvenes que podrían aumentar el flujo las bandas del infrarrojo medio y sesgar las estimaciones de masa (Endsley et al. 2022, Pérez-González et al. 2023a), así como la posible presencia de AGN en muchos de ellos (Barro et al. 2023). De hecho, muchas de estas galaxias que JWST está descubriendo a $z > 5$ parecen albergar AGN oscurecidos, como revelan las componentes anchas de las intensas líneas de emisión observadas con NIRSpec, sus peculiares distribuciones espectrales de energía (rojas en longitudes de onda mayores de $2 \mu\text{m}$, azules en bandas de longitudes de onda más corta) y su morfología compacta (Kocevski et al. 2023, Larson et al. 2023, Barro et al. 2023).

En los próximos meses continuaremos con la saga sobre las galaxias a muy alto desplazamiento al rojo, así como sobre las nuevas fuentes rojas descubiertas por JWST. Estamos comenzando a obtener datos significativamente más profundos que extienden las funciones de luminosidad al extremo débil y a desplazamientos al rojo más altos con programas como MIDIS, NGDEEP o JADES (Pérez-González et al. 2023b, Austin et al. 2023, Harikane et al. 2023, Adams et al. 2023). Proyectos

Figura 2. Ejemplos de las galaxias descubiertas por JWST que presentan colores muy rojos a longitudes de onda mayores que $2 \mu\text{m}$ (fila superior) y azules por debajo (fila central), siendo extremadamente débiles para observaciones HST (file inferior). Las estimaciones de masas estelares han sido consideradas como demasiado grandes para los modelos basados en Λ CDM. Esta figura está adaptada de Pérez-González et al. (2023a) y entraron en el artículo de Labbé et al. (2023), con masas mayores en el último artículo comparado con lo obtenido en el primero y en otros trabajos como Endsley et al. (2022).



como PRIMER y COSMOS-web nos darán mejores estadísticas para diferentes tipos de poblaciones de galaxias con densidades numéricas pequeñas pero que podrían representar etapas evolutivas importantes. La naturaleza de esas galaxias a $z=7-9$ supuestamente demasiado masivas también se investigará con campañas espectroscópicas de seguimiento, así como con datos fotométricos con MIRI. En resumen, los primeros 9 meses de JWST han sido increíbles, pero los resultados más emocionantes aún están por llegar.

REFERENCIAS

- Adams, N. J., et al. "Discovery and properties of ultra-high redshift galaxies ($9 < z < 12$) in the JWST ERO SMACS 0723 Field", MNRAS 518, 4755 (2023)
- Alcalde Pampliega, B., et al. "Optically Faint Massive Balmer Break Galaxies at $z > 3$ in the CANDLES/GOODS Fields", ApJ 876, 135 (2019)
- Arrabal Haro, P., et al. "Spectroscopic verification of very luminous galaxy candidates in the early universe", arXiv:2303.15431 (2023)
- Arrabal Haro, P., et al. "Spectroscopic confirmation of CEERS NIRCcam-selected galaxies at $z \sim 8-10$ ", arXiv:2304.05378 (2023)
- Atkins et al., 2022
- Austin, D., et al. "A Large Population of Faint $8 < z < 16$ Galaxies Found in the First JWST NIRCcam Observations of the NGDEEP Survey", arXiv:2302.04270 (2023)
- Barro, G., et al. "Extremely red galaxies at $z=5-9$ with MIRI and NIRSpect: dusty galaxies or obscured AGNs?", arXiv:2305.14418 (2023)
- Barrufet, L., et al. "Unveiling the nature of infrared bright, optically dark galaxies with early JWST data", MNRAS 522, 449 (2023)
- Bouwens, R. J., et al. "Evolution of the UV LF from $z=15$ to $z=8$ Using New JWST NIRCcam Medium-Band Observations over the HUDF/XDF", MNRAS.tmp (2023)
- Boyer, M. L., et al. "The JWST Resolved Stellar Populations Early Release Science Program. I. NIRCcam Flux Calibration <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022RNAAS...6..191B>", RNAAS 6, 191 (2022)
- Boylan-Kolchin, M. "Stress testing Λ CDM with high-redshift galaxy candidates", NatAs.tmp (2023)
- Bunker, A. J., et al. "JADES NIRSpect Spectroscopy of GN-z11: Lyman-alpha emission and possible enhanced nitrogen abundance in a $z=10.60$ luminous galaxy", arXiv:2302.07256 (2023)
- Carnall, A. C., et al. "A first look at the SMACS0723 JWST ERO: spectroscopic redshifts, stellar masses, and star-formation histories", MNRAS 518, L45 (2023)
- Castellano, M., et al. "Early Results from GLASS-JWST. XIX. A High Density of Bright Galaxies at $z \approx 10$ in the A2744 Region <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023ApJ...948L..14C>", ApJL 948, L14 (2023)
- Curtis-Lake, E., et al. "Spectroscopic confirmation of four metal-poor galaxies at $z = 10.3-13.2$ <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023NatAs...7..622C>", NatAs 7, 622 (2023)
- Donnan, C. T., et al. "The abundance of $z \geq 10$ galaxy candidates in the HUDF using deep JWST NIRCcam medium-band imaging", MNRAS 520, 4554 (2023)
- Endsley, R., et al. "A JWST/NIRCcam Study of Key Contributors to Reionization: The Star-forming and Ionizing Properties of UV-faint $z \sim 7-8$ Galaxies", arXiv:2208.14999 (2022)
- Finkelstein, S. L., et al. "A Long Time Ago in a Galaxy Far, Far Away: A Candidate $z \sim 12$ Galaxy in Early JWST CEERS Imaging", ApJL 940, L55 (2022)
- Finkelstein, S. L., et al. "CEERS Key Paper. I. An Early Look into the First 500 Myr of Galaxy Formation with JWST", ApJL 946, L13 (2023)
- Harikane, Y., et al. "Pure Spectroscopic Constraints on UV Luminosity Functions and Cosmic Star Formation History From 25 Galaxies at $z_{\text{spec}}=8.61-13.20$ Confirmed with JWST/NIRSpect", arXiv:2304.06658 (2023)
- Haslbauer, M. et al., "Has JWST Already Falsified Dark-matter-driven Galaxy Formation?", ApJ 939, 31 (2022)
- Keller, B. W., et al., "Can Cosmological Simulations Reproduce the Spectroscopically Confirmed Galaxies Seen at $z \geq 10$?", ApJ 943, 28 (2023)
- Kocevski, D. D., et al. "CEERS Key Paper. II. A First Look at the Resolved Host Properties of AGN at $3 < z < 5$ with JWST", ApJL 946, L14 (2023)
- Labbé, I., et al. "A population of red candidate massive galaxies 600 Myr after the Big Bang", Natur 616, 266 (2023)
- Larson, R. L., et al. "A CEERS Discovery of an Accreting Supermassive Black Hole 570 Myr after the Big Bang: Identifying a Progenitor of Massive $z > 6$ Quasars", arXiv:2303.08918 (2023)
- Lovell, C. C., et al. "Extreme value statistics of the halo and stellar mass distributions at high redshift:

- are JWST results in tension with Λ CDM?", MNRAS 518, 2511 (2023)
- Maiolino, R., et al. "JWST-JADES. Possible Population III signatures at $z=10.6$ in the halo of GN-z11", arXiv:2306.00953 (2023)
 - Mason, C. A., et al. "The brightest galaxies at cosmic dawn", MNRAS 521, 497 (2023)
 - McCaffrey, J., et al., "No Tension: JWST Galaxies at $z > 10$ Consistent with Cosmological Simulations", arXiv:2304.13755 (2023)
 - Naidu, R. P., et al. "Two Remarkably Luminous Galaxy Candidates at $z \approx 10-12$ Revealed by JWST", ApJL 940, L14 (2022)
 - Oesch, P. A., et al. "A Remarkably Luminous Galaxy at $z=11.1$ Measured with Hubble Space Telescope Grism Spectroscopy", ApJ 819, 129 (2016)
 - Pérez-González, P. G., et al. "Life beyond 30: probing the $-20 < M_{UV} < -17$ luminosity function at $8 < z < 13$ with the NIRCам parallel field of the MIRI Deep Survey", arXiv:2302.02429 (2023)
 - Pérez-González, P. G., et al. "CEERS Key Paper. IV. A Triality in the Nature of HST-dark Galaxies", ApJL 946, L16 (2023)
 - Prada, F., et al., "Confirmation of the standard cosmological model from red massive galaxies ~ 600 Myr after the Big Bang", arXiv:2304.11911, (2023)
 - Roberts-Borsani, G., et al. "Early Results from GLASS-JWST. I: Confirmation of Lensed $z \geq 7$ Lyman-break Galaxies behind the Abell 2744 Cluster with NIRISS", ApJL 938, L13 (2022)
 - Rodighiero, G., et al. "JWST unveils heavily obscured (active and passive) sources up to $z \sim 13$ ", MNRAS 518, L19 (2023)
 - Stark, D. P., et al. "Ly α and C III] emission in $z = 7-9$ Galaxies: accelerated reionization around luminous star-forming systems?", MNRAS 464, 469 (2017)
 - Stefanon, M., et al. "Stellar Mass Functions of Galaxies At $4 < z < 7$ from an IRAC-selected Sample in Cosmos/Ultravista: Limits on the Abundance of Very Massive Galaxies", ApJ 803, 11 (2015)
 - Wang, T., et al. "A dominant population of optically invisible massive galaxies in the early Universe", Nature 572, 211 (2019)
 - Yang, L., et al. "Early Results from GLASS-JWST. V: The First Rest-frame Optical Size-Luminosity Relation of Galaxies at $z > 7$ ", ApJL 938, L17 (2022)
 - Zavala, J. A., et al. "Dusty Starbursts Masquerading as Ultra-high Redshift Galaxies in JWST CEERS Observations", ApJL 943, L9 (2023)

ARRAKIHS: UNA NUEVA LUZ

El 2 de noviembre de 2022 la Agencia Espacial Europea (ESA) anunció la nueva misión espacial de clase F para su programa científico: ARRAKIHS (Analysis of Resolved Remnants of Accreted galaxies as a Key Instrument for Halo Surveys). ARRAKIHS se propone desentrañar el enigma de la naturaleza de la materia oscura que conforma más de un 80% de la materia que hay en el universo, según los modelos teóricos actuales.



M. Angeles Gómez Flechoso
Universidad Complutense de Madrid
magflechoso@ucm.es

Santi Roca-Fàbrega
Observatorio de Lund
santi.roca_fabrega@fysik.lu.se

Rafael Guzmán Llorente
Instituto de Física de Cantabria
guzman@ifca.unican.es

David Martínez Delgado
Instituto de Astrofísica de Andalucía
dmartinez@iaa.es

Para ello ARRAKIHS observará el universo local a niveles muy bajos de brillo superficial nunca antes alcanzados en longitudes de onda visible e infrarroja, utilizando un conjunto de cámaras de gran precisión a bordo de un satélite que orbitará en torno a la Tierra a 800 km de altura. Actualmente, ARRAKIHS ha sido aprobada para la fase A/B que culminará con la Revisión de Diseño Preliminar (PDR) al final del 2025. Tras pasar con éxito la PDR, ARRAKIHS será formalmente adoptada como la misión F2 de la ESA con un lanzamiento previsto en 2029-30. ARRAKIHS es la primera misión científica de la ESA liderada por España.

EL ENIGMA DE LA MATERIA OSCURA DEL UNIVERSO

El modelo cosmológico estándar Λ -CDM predice que el contenido de energía y materia en el universo está dominado por las enigmáticas “constante cosmológica” (Λ) y “materia oscura fría” (CDM), cuyas naturalezas se desconoce. Este modelo describe la formación de galaxias en el marco de formación jerárquica del universo mediante fusiones de halos de materia más pequeños que se agrupan, aumentando el contenido en materia oscura, gas y estrellas hasta obtener galaxias como las observadas en el universo local. Este proceso es continuo e implica que en torno a cualquier galaxia se deberían observar objetos de menor masa (galaxias satélite enanas, o GSE) que están siendo acretadas en el halo de la galaxia mayor, presentando en sus fases finales la formación de estructuras elongadas y difusas (corrientes estelares de marea, o CEM) que contienen estrellas arrancadas de dichas GSE.

Las simulaciones numéricas realizadas en el marco del modelo Λ -CDM confirman que debe haber un gran número de GSE y CEM en los halos de galaxias similares a la Vía Láctea. La presencia de GSE y CEM en halos de galaxias ha sido corroborada en numerosas ocasiones con observaciones de galaxias del universo local, incluyendo el Grupo Local (Fig. 1). Sin embargo, existe una gran discrepancia sobre la estadística de estos sistemas en relación con las observaciones, ya que las simulaciones predicen una mayor abundancia de GSE y CEM que las que se observa. Actualmente, no se sabe si esta discrepancia es debida a que el modelo estándar necesita ser revisado o si, por el contrario, es debida a una limitación en las observaciones por la cual no se han detectado la mayoría de GSE y CEM al tener muy bajo brillo superficial.

SOBRE LA MATERIA OSCURA

El número de CEM y GSE que se forman en los halos de galaxias depende principalmente de la naturaleza de la materia oscura. Si en lugar de ser “fría” (partículas masivas moviéndose lentamente), la materia oscura fuera “templada” (partículas más ligeras moviéndose más rápidamente) o estuviera formada por partículas de materia oscura interactuantes, se impediría la formación de halos poco masivos mientras se mantendría la formación de halos mayores. Así se explicarían tanto la baja frecuencia de CEM y GSE en los halos de galaxias como la estructura a gran escala del universo. Un efecto parecido podría conseguirse modificando el mecanismo de “feedback” bariónico debido a explosiones de supernovas o a la presencia de agujeros negros súper-masivos. En ambos casos, ello implicaría cambiar o el modelo cosmológico estándar que se ha venido adoptando desde finales del siglo pasado o la implementación más reciente del “feedback” bariónico en los últimos modelos de formación de galaxias.

Por otro lado, sería posible que las observaciones actuales no hayan detectado todavía la mayoría de los CEM y GSE con muy bajo brillo superficial. Actualmente, solo un 10% de las galaxias observadas presentan al menos una CEM. La observación de estos objetos en galaxias del universo local se ve muy limitada en observatorios terrestres por la atmósfera, que hace muy difícil la observación de estructuras con brillos superficiales más débiles que 29 mag/arcsec² en el visible y prácticamente imposible observarlas en el infrarrojo al ser la atmósfera ~1000 veces más brillante. Es precisamente en el infrarrojo donde se espera que las GSE y las CEM sean más brillantes, ya que ambas presentan poblaciones estelares viejas. Según los últimos estudios, si se lograra alcanzar brillos superficiales más bajos que 30 mag/arcsec² debería observarse al menos una CEM en prácticamente todas las galaxias similares a la Vía Láctea. Si no es así, estas observaciones impondrían la necesidad de cambiar o bien la teoría de materia

Figura 1. Imágenes de galaxias del universo local obtenidas con telescopios de pequeña apertura mostrando la detección de las CEM de diferentes morfologías. El límite de brillo superficial de estas imágenes es 28-29 mag/arcsec² (crédito: D. Martínez-Delgado).

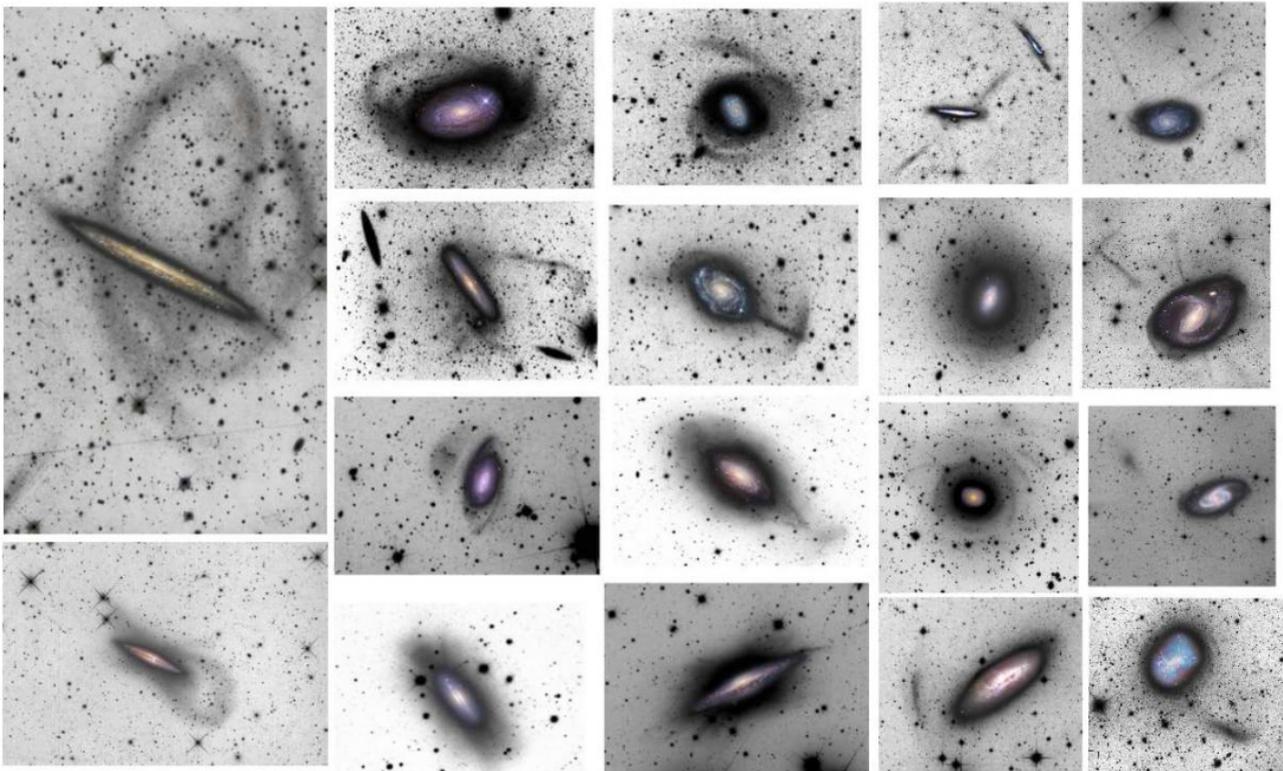




Figura 2. Modelo de vuelo de la cámara binocular iSIM-170 validada en el módulo japonés KIBO de la ISS en 2020 (crédito: Satlantis).

oscura fría o bien el mecanismo de “feedback” bariónico utilizado en las simulaciones. La determinación de las funciones de luminosidad de las GSE observadas a este mismo límite en brillo superficial permitirá deshacer la ambigüedad entre ambos efectos.

LA MISIÓN ESPACIAL ARRAKIHS

El consorcio científico-tecnológico responsable de ARRAKIHS está liderado por el Dr. Rafael Guzmán (Instituto de Física de Cantabria, IFCA) en colaboración con investigadores del IFCA, el Instituto de Ciencias del Espacio (ICE), la Universidad Complutense de Madrid (UCM), el Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA), el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y el Centro de Astrobiología (CAB). Los equipos de in-

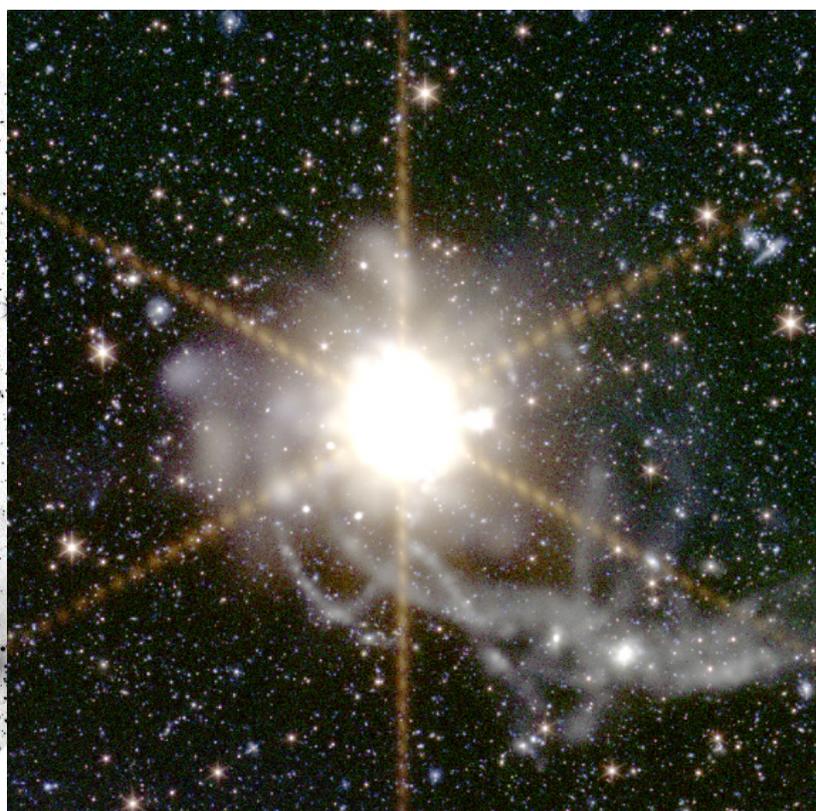
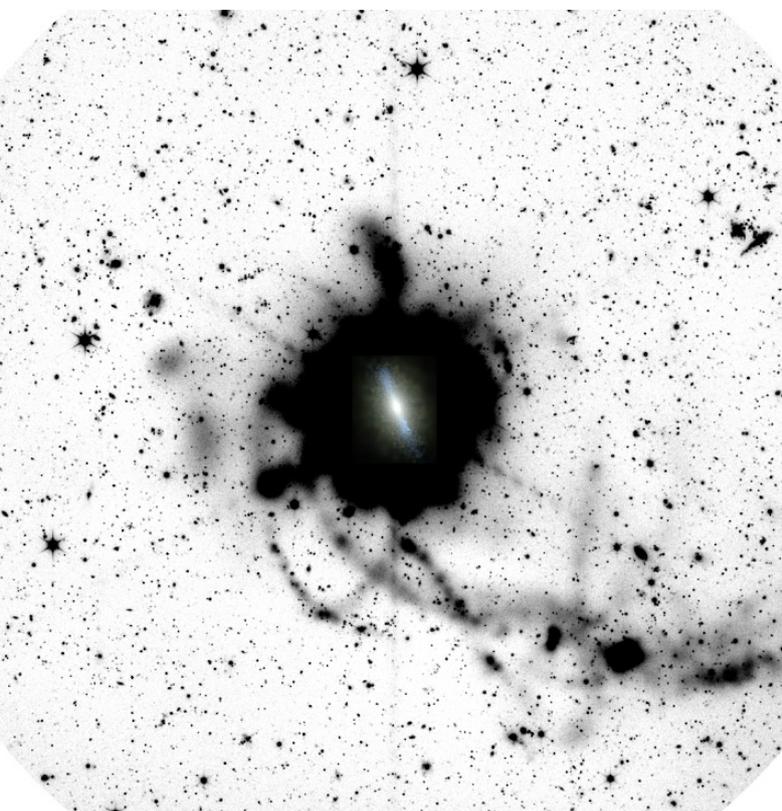
vestigación españoles que participan en ARRAKIHS están coordinados por la Dra. M. Angeles Gómez-Flechoso (UCM). A día de hoy, el consorcio de ARRAKIHS incluye a más de 50 investigadores de 20 centros de investigación y universidades en Suiza, Suecia, Austria, Bélgica, Reino Unido, Estados Unidos, Taiwan y Tailandia. El consorcio incluye también a empresas europeas del sector aeroespacial en Suiza, Bélgica y el Reino Unido lideradas por la empresa española Satlantis, que es la principal responsable de proporcionar la carga útil del satélite, en colaboración con el IFCA, ICE, CEFCA, la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). El equipo de desarrollo tecnológico del consorcio ARRAKIHS está coordinado por el Dr. Santiago Serrano (Satlantis/ICE).

El objetivo principal de ARRAKIHS es dilucidar la naturaleza de la materia oscura y el mecanismo de “feedback” bariónico mediante observaciones desde el espacio de las GSE y CEM en los halos de una muestra estadísticamente representativa de galaxias similares a la Vía Láctea en el universo local a brillos superficiales más bajos que 30 mag/arcsec^2 . Para llevar a cabo esta misión, se utilizarán dos innovadoras cámaras binoculares iSIM-170 (Fig. 2) desarrolladas por la empresa Satlantis. Cada una de estas cámaras consta de dos telescopios con $f/10$ y 150 mm de diámetro que alojan cuatro filtros cubriendo el rango completo de 400 nm a 1700 nm. El diseño de cámara iSIM ha sido validado con éxito en el espacio tanto en

la Estación Espacial Internacional (ISS) como a bordo de micro-satélites, demostrando la mejor calidad de imagen disponible para satélites por debajo de 500 kg. En esta fase inicial de ARRAKIHS, se utilizará una versión de iSIM-170 para observaciones desde el Observatorio de Javalambre para demostrar su calidad de imagen y refinar tanto la estrategia observacional como el procesado de imagen con un equipo liderado por el Dr. Antonio Marín (CEECA).

En la definición de la misión no sólo ha sido clave el acceso a la tecnología, sino también disponer de modelos cosmológicos que nos permitan simular e interpretar los resultados que se obtengan

Figura 3. Imagen simulada del halo de una galaxia tipo Vía Láctea tal y como se vería en ARRAKIHS tras 900 exposiciones de 10 minutos con iSIM-170 en el filtro Euclid VIS (izquierda) y combinando los cuatro filtros HST F418X y Euclid VIS, Y, J (derecha). La simulación parte de un modelo Garrotxa de galaxia tipo Vía Láctea e incluye la contribución de la luz zodiacal, la extinción galáctica y el fondo cosmológico de Illustris, la contaminación de luz dispersa debido a la Tierra, la Luna y las estrellas para una órbita heliosíncrona a 800 km, así como el modelizado de la calidad de imagen y los efectos sistemáticos de la opto-electrónica de iSIM-170 (crédito: Alejandro Camazón).



independientemente de los efectos numéricos asociados al código de simulación utilizado. El consorcio ARRAKIHS tiene acceso a las simulaciones de la colaboración AGORA a través del Dr. Santi Roca-Fàbrega (Observatorio de Lund), quien coordina el equipo de simulaciones cosmológicas del consorcio. Dicha colaboración analiza una misma simulación con las mismas condiciones iniciales modelizada con la mayor parte de los códigos numéricos disponibles en la comunidad, lo que permite establecer la varianza en las características de la población de GSE y de las CEM debida a efectos numéricos y distinguirlos de las características reales de estos objetos. Finalmente, ARRAKIHS ha optimizado su estrategia observacional a partir de la gran experiencia del equipo de observadores coordinado por el Dr. David Martínez-Delgado (IAA), quien lidera el censo más completo de GSE y CEM observados desde tierra hasta la fecha. Combinando estos modelos e incorporando todos los efectos observacionales e instrumentales se han podido simular imágenes “mock” (Fig. 3; Camazón et al. 2023, en preparación) que reproducen fielmente los resultados que obtendrá ARRAKIHS. El análisis de estas imágenes “mock” comparadas con las observaciones nos permitirá interpretar los resultados según las predicciones de los diferentes modelos cosmológicos y últimamente discernir cuál es la naturaleza de la materia oscura.

Esta combinación de teoría, observación e instrumentación en la frontera del conocimiento sitúan al consorcio científico-tecnológico de ARRAKIHS en la vanguardia tanto de los estudios de materia oscura como de la formación de las GSE y CEM en los halos de galaxias tipo Vía Láctea. ARRAKIHS ofrece además a España una posición de liderazgo mundial en el aún inexplorado universo de muy bajo brillo superficial.

EL ORIGEN DE ARRAKIHS

Nuestra historia comenzó en 2010 durante la reunión científica de la SEA en Madrid, donde nos encontramos tres viejos amigos y comenzamos a debatir cómo juntar nuestros conocimientos para poder desentrañar la naturaleza de la materia oscura. Veíamos el problema desde puntos de vista complementarios pues cada uno aportaba su experiencia en los ámbitos observacional, teórico y tecnológico. Al terminar la reunión de la SEA, los

tres coincidimos en un mismo sueño: colaborar en una misión espacial que permitiera contestar a la pregunta: “¿Qué es la materia oscura?”. En los años que siguieron a este encuentro incorporamos nuevos amigos y colaboradores a nuestro proyecto, disfrutamos de muchas y buenas discusiones científicas y comenzamos el desarrollo de la tecnología necesaria para competir en futuras misiones al espacio. Finalmente, en 2022 presentamos dos propuestas: DUNES a la NASA y ARRAKIHS a la ESA (cada nombre tiene su propia historia para ser contada en otra ocasión...). No conseguimos DUNES, pero ARRAKIHS venció a otras 19 propuestas de consorcios europeos en un proyecto muy competitivo que duró 9 meses para ser finalmente seleccionada como la nueva misión de clase F.

En estos 13 años, hemos pasado momentos intensos discutiendo de ciencia hasta altas horas de la noche. Hemos pasado días ilusionantes diseñando, perfeccionando y verificando nuestra cámara, nuestra estrategia observacional y nuestros modelos teóricos. Hemos pasado horas estresantes para llegar a tiempo con todo listo dentro de los plazos de entrega de las propuestas y para hacer frente a la inmensa presión durante el bautismo de fuego de toda misión espacial de la ESA en la CDF (la “temible” Concurrent Design Facility). Pero sobre todo, estamos disfrutando con una aventura que no ha hecho nada más que comenzar. Tenemos un largo e intenso camino hasta el lanzamiento de ARRAKIHS y después viviremos grandes emociones analizando los datos y descubriendo un poco más cómo es nuestro universo. ¿Llegaremos a desentrañar la naturaleza de la materia oscura? Confiamos en que sí. También estamos convencidos de que esta misión nos llevará a nuevos descubrimientos en este universo aun inexplorado a muy bajo brillo superficial que a día de hoy ni nos imaginamos y que podremos explorar con ARRAKIHS. Queremos que la comunidad astronómica de la SEA en la que surgió este sueño, así como las agencias estatales españolas que tanto nos han apoyado para hacer realidad ARRAKIHS, compartáis con nosotros esta aventura. Desde aquí, os agradecemos vuestro apoyo y os invitamos a uniros a ARRAKIHS para colaborar juntos en esta nueva etapa de descubrimiento y exploración del universo a muy bajo brillo superficial desde el espacio.



Figura 4. Cohete de lanzamiento Vega-C de la Agencia Espacial Europea despegando, que será el vehículo que pondrá en el espacio la misión ARRAKHS dentro de unos seis años.

EL SEGUIMIENTO E IMPACTO DE PEQUEÑOS

El seguimiento de asteroides desde España se realiza en el marco de un esfuerzo colaborativo en el que están implicados diversos centros de investigación en colaboración directa con el Centro de Coordinación de Objetos Cercanos a la Tierra de la ESA (ESA-NEOCC). Uno de esos observatorios privilegiados está en la Sierra del Montsec donde opera el Telescopio Joan Oró que, desde hace una década, ha sido empleado por nuestros grupos de investigación para el seguimiento de estos objetos [1-2-3]. A veces la realidad supera la ficción y, un nuevo descubrimiento, puede implicar tener que realizar observaciones in extremis, con el asteroide a punto de chocar contra la Tierra. Así ocurrió el pasado 11 de marzo de 2022 con la caída de un asteroide de pocos metros cerca de Islandia o más recientemente el 12 de febrero de 2023 en Normandía.



Toni Santana-Ros

Universidad de Alicante / ICCUB
tsantanaros@icc.uv.es

Josep M. Trigo-Rodríguez

Institut de Ciències de l'Espai (CSIC) / IEEC
trigo@ice.csic.es

Los programas de descubrimiento de asteroides se están haciendo tan eficientes que, estos hallazgos de asteroides en ruta de colisión se harán cada vez más frecuentes. Su valor añadido es que tendremos la oportunidad de recuperar nuevos meteoritos para comprender mejor la naturaleza de los objetos que pueden poner en jaque súbitamente a nuestro planeta.

2022 EB5

A las 19:38 UTC del 11 de marzo de 2022, el observatorio Piskéstető, en Hungría, reporta al Minor Planet Center el descubrimiento de un nuevo asteroide, designado provisionalmente como Sar2593 por el observador Krisztián Sárneczku. Como las observaciones parecen indicar que el objeto puede acercarse mucho a la Tierra, Krisztián decide obtener y reportar nuevos datos a las 20:16 UTC. Con 40 minutos de arco orbital observado, el sistema de alertas *Meerkat* de la ESA se activa para mandar un mensaje inequívoco: Sar2593 tiene un 100% de probabilidad de impactar con la Tierra entre las 21:21 y las 21:25 UTC (del mismo día).

En cuestión de pocos minutos, el ESA-NEOCC activó sus activos para poder observar el asteroide. Los objetivos eran claros: precisar la hora de impacto, acotar el lugar de entrada a la atmósfera y estimar el tamaño del cuerpo.

La red de observadores se pone en marcha rápidamente, junto con astrónomos amateurs situados en Europa y Asia que también han recibido la alerta. En el caso del ESA-NEOCC, la coordinación de sus telescopios se hace a través del proyecto CARMEN, que incluye telescopios en territorio estatal, tales como el OGS (Canarias), CAHA Schmidt (Andalucía) y el TJO (Cataluña). En pocos minutos, se reportan nuevos datos del mismo descubridor y desde un observatorio en Kysuce, Eslovaquia. El objeto se encuentra ya muy próximo, a solo 1/7 de la distancia Tierra-Luna. Uno de los telescopios de la red de la ESA y del proyecto CARMEN, el Klet observatory de la República Checa, consigue la última imagen del cuerpo antes de su entrada en la atmósfera (Fig. 1), a falta de tan solo 13 minutos para el impacto.

Por suerte, los datos confirman que el tamaño del cuerpo y el lugar del impacto no van a representar un problema para la población. Este meteoritoide de unos pocos metros de diámetro, impacta a las 21:22:42 UTC del 11 de marzo de 2022 a unos 140 km al sur de la isla de Jan Mayen, en el mar de Noruega.

ASTEROIDES : RETO Y OPORTUNIDAD CIENTÍFICA

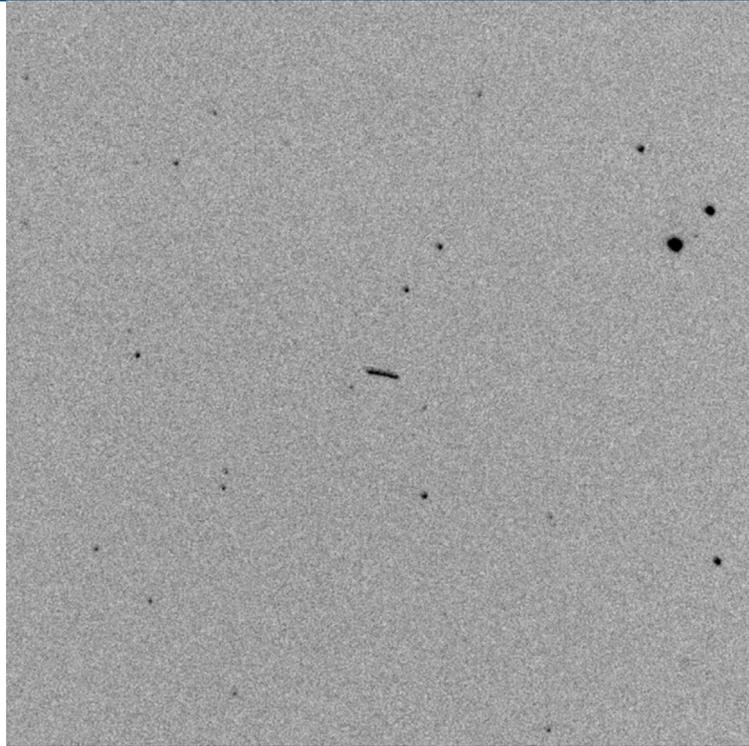


Figura 1. El trazo en la parte central de la imagen es del asteroide 2022 EB5, observado a las 21:10 UTC del 11 de marzo de 2022 desde el observatorio Klet (República Checa), sólo 13 minutos antes de impactar con la atmósfera terrestre. Créditos: Klet Observatory.

Una vez confirmadas las observaciones reportadas, Sar2593 pasó a tener la designación oficial de 2022 EB5. Este fue el quinto cuerpo detectado y observado antes de que impactara con la Tierra. El impacto con la atmósfera generó una onda de choque detectable desde las estaciones de infrasonidos cercanas, que reportaron una energía equivalente a 2-3 kT de TNT.

ASTEROIDE, METEOROIDE, METEORO, METEORITO...

Cuando se descubre algún asteroide que se aproxima a la Tierra, es habitual ver en la prensa noticias que mezclan los términos asteroide, meteoro o meteorito.

Merece la pena recordar que un asteroide es un cuerpo celeste, rocoso, metalorocoso o metálico, más pequeño que un cuerpo planetario (es decir, inferior a 1000 km) pero mayor que un meteoroides, y que está en órbita, es decir, que no ha entrado en contacto con la atmósfera [4]. A su turno, los meteoroides son cuerpos celestes mayores que el polvo cósmico, pero menores a 50 m, tamaño a partir del cual pasarían a llamarse asteroides.

Cuando uno de estos cuerpos entra en contacto con la atmósfera, se calientan y producen una estela luminosa que llamamos meteoro. Cuando esas

estelas son más luminosas que el planeta Venus se denominan bólidos o bolas de fuego. Finalmente, si parte de este cuerpo consigue sobrevivir a las condiciones extremas de calor y presión durante su paso por la atmósfera, precipitándose en la superficie de la Tierra, tendremos la oportunidad de poder encontrar sus restos en forma de meteorito.

2023 CX1

Recientemente, el 12 de febrero de 2023, se descubrió otro cuerpo que estaba a punto de impactar con la Tierra. De nuevo su descubridor fue el astrónomo húngaro Krisztián Sárneczku, pero en esta ocasión el margen para hacer un seguimiento de la trayectoria del meteoroides resultó un poco mayor: el objeto se descubrió 6 horas antes de producir la bola de fuego. De nuevo, los telescopios del proyecto CARMEN de la ESA apuntaron rápidamente al objetivo, consiguiendo imágenes desde lugares alejados entre sí, como son el observatorio de Sutherland en Sudáfrica, o el observatorio McDonald en EEUU. Obtener astrometría desde puntos tan distantes permitió una gran mejora del cálculo de la órbita de 2023 CX1, gracias al gran paralaje y, de este modo, determinar con gran precisión que el objeto haría impacto cerca de la costa de Normandía, Francia.

Antes del impacto, pudimos obtener más de una hora de observaciones de este cuerpo usando el telescopio Joan Oró, en el Observatori del Montsec, en Catalunya (Fig. 2). Estos datos están siendo actualmente analizados, y nos permitirán conocer más detalles de las características físicas del meteoróide antes de que atravésará nuestra atmósfera.

Gracias a la gran exactitud del cálculo de la posición de impacto del asteroide, fue fácil poder prever la dirección de caída del cuerpo. Usando cámaras de seguridad dirigidas en la dirección correcta, pudimos observar en directo el gran destello que produjo el cuerpo al atravesar la atmósfera desde el Observatorio del Montsec (OdM). De hecho, se dio la circunstancia de que esa bola de fuego se pudo observar desde las cámaras de seguridad situadas cerca del mismo telescopio Joan Oró (Fig. 3), un buen ejemplo del baluarte natural que supone la Sierra del Montsec para la observación astronómica. Desde un mismo sitio pudimos observar el meteoróide todavía en el espacio y... ¡ahora lo veíamos caer y generar un enorme bólido a más de 900 km de distancia!

Desde ubicaciones más cercanas al punto de impacto, observadores aficionados y profesionales tuvieron la oportunidad de obtener imágenes espectaculares del momento en que 2023 CX1 cruzaba la atmósfera terrestre (Fig. 4). Desgraciadamente la distancia al lugar de caída hizo que esa bola de fuego no fuese captada por otros dispositivos de registro automatizado de bólidos operados por la Red Española de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos coordinada desde el ICE-CSIC y el IEEC [5]. De hecho, no olvidemos que todavía muchos de los meteoroides que poseen pocos metros de diámetro impactan sin ser detectados por los programas de seguimiento telescópicos [6].

Posteriormente, el equipo de la Fireball Recovery and InterPlanetary Observation Network (FRIPON) organizó campañas para poder encontrar restos en forma de meteorito procedentes de 2023 CX1. Sólo un par de días después del impacto, el equipo de FRIPON consiguió encontrar un fragmento de meteorito en las costas de Normandía (Fig. 5). 2023 CX1 había sido observado como meteoróide por los telescopios, en forma de meteoro por las cámaras de seguridad y ahora... ¡teníamos sus meteoritos!

SURVEYS, SIEMPRE VIGILANDO

El descubrimiento de nuevos asteroides ha aumentado de forma drástica durante la última década. Si nos fijamos solo en los objetos cercanos a la Tierra (NEOs, del Inglés Near Earth Objects), conocemos actualmente más de 30.000 [7]. A principios de la década del 2010, el *ratio* de detección de nuevos NEOs no llegaba a los 1.000 cuerpos anuales. Actualmente estamos descubriendo casi 4.000 asteroides cada año.

¿Cómo podemos explicar este aumento, si cada vez es más difícil detectar nuevos cuerpos?, ¡puesto que los de fácil detección ya los hemos encontrado! La explicación la encontramos en los telescopios de rastreo o *survey*. Estos telescopios rastrean más de 3 veces por noche cada parcela del cielo visible, generando grandes cantidades de datos. Datos que ahora podemos procesar más eficientemente con técnicas como el *synthetic tracking*. Con la ayuda de este software, podemos apilar las imágenes de un mismo campo en múltiples (miles) de direcciones distintas, de modo que podemos detectar un cuerpo que se mueve dentro de esas imágenes sin necesidad de saber de antemano su órbita.

Los principales surveys dedicados a la búsqueda de nuevos NEOs se encuentran en América. Para mejorar nuestra capacidad de detección desde Europa, la ESA está construyendo dos telescopios con un gran campo de visión, especialmente diseñados para la búsqueda de estos pequeños cuerpos celestes. Nos referimos a los telescopios llamados *Flyeye*, llamados así por su parecido a los ojos de este insecto (fly eye significa ojo de mosca en inglés), los cuales sirvieron de inspiración para su diseño. La primera unidad de estos telescopios se instalará en el Monte Mufara de Sicilia, Italia.

OBSERVANDO LOS ATIRA CON EL TELESCOPI JOAN ORÓ

Hay un subgrupo de NEOs tan particular como interesante desde un punto de vista científico. Se trata de los asteroides con órbitas interiores a la de la Tierra (IEOs del inglés Interior Earth Objects), llamados *Atiras* por ser (163693) Atira el primer asteroide confirmado a pertenecer a esta clase orbital. Conocer más detalles de la dinámica y composición de estos objetos nos va a ayudar a refinar nuestros modelos de la evolución del Sistema Solar, así como estudiar cuerpos

constantemente sometidos a condiciones extremas de temperatura. Además, estos cuerpos pueden variar su órbita después de un encuentro con los planetas interiores, mandándolos a órbitas más externas. Como esto implica cruzar la órbita de la Tierra, tener estos cuerpos catalogados también es interesante desde un punto de vista de defensa planetaria.

Hasta el momento se conocen solo 30 *Atiras*: ¿hay tan pocos cuerpos en órbitas interiores? La respuesta es evidentemente que no. Para entender el porqué de este sesgo observacional tenemos que visualizar la geometría a la que podemos observar estos cuerpos. Al encontrarse en órbitas interiores, estos cuerpos siempre se localizan en posiciones aparentes muy próximas al Sol. Por este motivo, sólo son visibles durante cortas ventanas de observación cercanas al crepúsculo y, por si esto no fuera poco, en elevaciones muy bajas, cerca del horizonte. En esta región del cielo podemos encontrar también otros objetos con órbitas no necesariamente interiores, pero igualmente

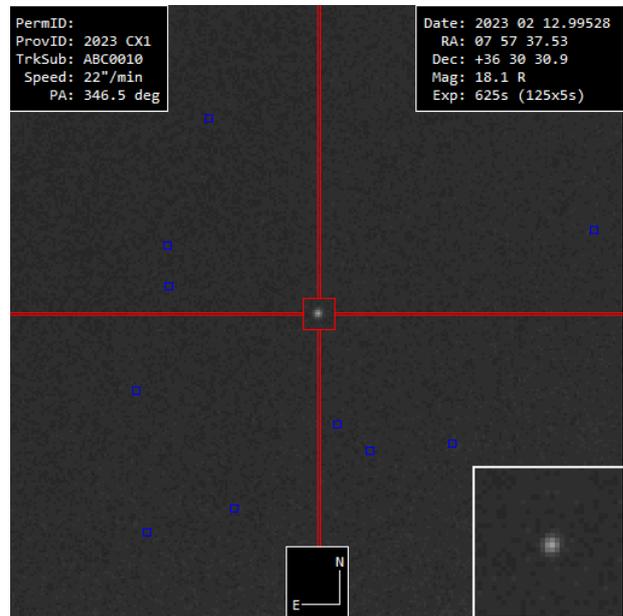


Figura 2. Nuestras observaciones del asteroide 2023 CX1 con el telescopio Joan Oró (TJO). Créditos: T. Santana-Ros, UA/UB-IEEC.



Figura 3. Bola de fuego generada por 2023 CX1, captada a unos 900 km de distancia desde las cámaras de vigilancia del Observatori del Montsec. Las cúpulas que se pueden ver en la foto corresponden a la de los telescopios TJO (derecha) y TFRM (izquierda). Créditos: OdM/IEEC.



Figura 4. Imágen de la entrada de 2023 CX1 en la atmósfera captada desde Holanda (Créditos: Gijs de Reijke).

Figura 5. Meteorito procedente de 2023 CX1 recuperado en el norte de Francia (Créditos: FRIPON/Vigie-Ciel).



interesantes desde un punto de vista científico: los cuerpos coorbitales. Entre estos cabe destacar los asteroides troyanos, cuerpos que orbitan alrededor de los puntos de Lagrange L4 y L5. En el caso de la Tierra, hemos descubierto recientemente el segundo de estos objetos, el asteroide 2020 XL5 [8].

La gran mayoría de programas de seguimiento (*surveys*) nunca (o raramente) observa esas parcelas del cielo, sea por limitaciones técnicas del telescopio o simplemente porque prefieren observar en la dirección opuesta al Sol, donde las condiciones de observación serán evidentemente mucho mejores.

El Telescopio Joan Oró, de 80 cm de diámetro, es de los pocos telescopios de su categoría que, por su privilegiada localización y por su construcción, permiten observaciones a muy poca elevación. Por este motivo, llevamos a cabo desde hace unos pocos meses un proyecto a largo plazo de rastreo de zonas cercanas al Sol durante los crepúsculos, con el objetivo de descubrir y caracterizar nuevos *Atiras*.

IMPACTOS MÁS ALLÁ DE LA TIERRA

Los meteoroides de pocos centímetros suelen desintegrarse en su totalidad al cruzar la atmósfera terrestre. Por este motivo, es complicado monitorizar la cantidad y características de estos pequeñísimos cuerpos. Estas partículas colisionan constantemente con nuestros satélites, por lo que tener más información sobre esta población representa una prioridad para muchas agencias espaciales. Afortunadamente, esas pequeñas rocas son captadas sistemáticamente en fase de bola de fuego por las redes que monitorizan la actividad meteórica y que permiten cuantificar el flujo y la masa de estos meteoroides [9-10].

Por otro lado, nuestro fiel acompañante espacial, nos da una oportunidad única para poder estudiar estos pequeños cuerpos. Como parte del proyecto CARMEN de la ESA, dos equipos de astrónomos del Instituto de Astronomía de Andalucía (IAA) y de la universidad de Huelva (UHU), observan regularmente la parte no iluminada de la Luna y registran periódicamente destellos producidos por el impacto de pequeños meteoroides. El estudio de la duración y magnitud del destello, así como la frecuencia de impacto, nos permite obtener información sobre estas migas del Sistema Solar que viajan por nuestra vecindad.

REFERENCIAS

1. Trigo-Rodríguez J.M., Santana-Ros T., Moreno-Ibañez M., Rodríguez D., Sanz J. Lloro I. and Sánchez A. (2017) Asteroids, Comets and Meteorite-Dropping Bolidos Studied from The Montsec Astronomical Observatory. In "Assessment and mitigation of asteroid impact hazards", Springer, Astrophysics and Space Science, Vol. 46, pp. 243-256.
2. Micheli M., Koschny D., Conversi L., Budnik F., Gray B., Santana-Ros T., Reszelewski R., et al., 2021, *AcAau*, 184, 251.
3. Farnocchia D., Reddy V., Bauer J.~M., Warner E.~M., Micheli M., Payne M.~J., Farnham T., et al., 2022, *PSJ*, 3, 156.
4. Trigo-Rodríguez J.M. (2022) Asteroid Impact Risk: Impact Hazard from Asteroids and Comets, Springer Nature, Switzerland AG, 172 pp.
5. Peña-Asensio E., J.M. Trigo-Rodríguez y A. Rimola (2022) Análisis automático de bólidos productores de meteoritos y reentradas atmosféricas. Nuevo software de la Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos", *Revista Española de Física n.36-1*, pp.15-20.
6. Peña-Asensio E., Trigo-Rodríguez J.M., and Rimola A. (2022) "Orbital characterization of superbolidos observed from space: Dynamical association with near-Earth objects and identification of hyperbolic meteoroids", *The Astronomical Journal*, 164, 73.
7. CNEOS Discovery Statistics ([nasa.gov](https://www.nasa.gov))
8. Santana-Ros T., Micheli M., Faggioli L., Cennamo R., Devogèle M., Alvarez-Candal A., Oszkiewicz D., et al., 2022, *NatCo*, 13, 447.
9. Trigo-Rodríguez J.M., and Blum J. (2022) Learning about comets from the study of mass distributions and fluxes of meteoroid streams, *MNRAS* 512, 2277-2289.
10. Peña-Asensio E., Trigo-Rodríguez J.M., Corretgé-Gilart M., Rimola A., and Koschny D. (2023) Identifying meteorite droppers among the population of bright 'sporadic' bolidos imaged by the Spanish Meteor Network during the spring of 2022, *MNRAS* 520, 5173-5182.

En este mes de junio de 2023 se cumplen justo 25 años de la instalación del primer telescopio robótico en España, un modesto reflector Schmidt-Cassegrain de 30 cm de diámetro a f/10 en el entorno de la Estación de Sondeos Atmosféricos (ESAt) del Centro de Experimentación de El Arenosillo (CEDEA) del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), a unos 10 km de Mazagón (Huelva), en pleno entorno natural de Doñana y a 100 m de la Playa de Castilla, de las pocas vírgenes que aún quedan en la España peninsular. Dicha estación recibió el nombre de BOOTES-1 por ser la primera relacionada al acrónimo del experimento con ella iniciado (y también nombre de una constelación boreal): BOOTES (*Burst Observer and Optical Transient Exploring System*, que se pronuncia tal cual al ser latino y no [bu:ts]).



Alberto J. Castro-Tirado

Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) /
Universidad de Málaga
ajct@iaa.es / @AJCastroTirado

Desde entonces, han tenido que transcurrir casi 25 años más para que el pasado diciembre de 2022 viera la primera luz BOOTES-7 en Chile, la última de las estaciones de la Red Global BOOTES que faltaba para completar la misma, haciendo con ello que España se convirtiese en 2022 en el primer país que despliega una red global de telescopios, habiéndolo hecho antes que otras dos conocidas naciones que también perseguían este logro. Ver Figura 1.

El primer telescopio robótico de la red BOOTES (acrónimo en inglés de *Observatorio de estallidos y Sistema de exploración de fuentes esporádicas ópticas*), fue instalado en 1998 en el INTA-CEDEA y resultante de una colaboración hispano-checa, entre el INTA y el Observatorio Astronómico de Ondřejov (Rep. Checa). De modesto tamaño, tenía adosado dos cámaras CCDs con objetivos de 50 mm a f/2 con los que adquirir imágenes de gran campo de manera simultánea. Este último sistema evolucionó con los años, como no podía ser de otra manera, manteniéndose optimizado para Astronomía de gran campo, con diversos sistemas hoy día que en esta estación BOOTES-1 alcanzan campos desde $5^\circ \times 5^\circ$ hasta $15^\circ \times 15^\circ$.

En paralelo, desplegamos la estación BOOTES-2 en la sede del Instituto de Hortofruticultura Subtropical y Mediterránea "La Mayora", centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y la Universidad de Málaga (IHSM/UMA-CSIC) en Algarrobo-Costa (Málaga), con primera luz en 2001. En 2008 reemplazamos el reflector de 30 cm por un Ritchey-Chrétien de 60 cm a f/8, adosado a una montura ecuatorial alemana NTM-500 de Astelco de alta velocidad de movimiento (100 grados/s y con aceleración de 10 grados/s²) para poder responder a eventos transitorios con gran celeridad. También sustituimos la vetusta CCD de SBIG por una EMCCD Ixon de Andor para proporcionar un campo de visión de $10' \times 10'$ y con un juego de filtros SDSS u' g' r' i' complementados por dos de WFCAM/VISTA (Z e Y) así como por un filtro 'clear' (todos con el mismo espesor óptico para no tener que reenfoque al cambiar de filtro). Y es esta configuración instrumental la que hemos ido replicando en el resto de observatorios de la Red desde entonces, ampliándola a todo el globo con las estaciones BOOTES-3 (Lauder, Nueva Zelanda, 2009), BOOTES-4 (Lijiang, China, 2012),



Figura 1. Las 7 estaciones de la Red Global BOOTES, con el año de instalación: BOOTES-1 (El Arenosillo, España, 1998), BOOTES-2 (Algarrobo-Costa, 2011), BOOTES-3 (Lauder, Nueva Zelanda, 2009), BOOTES-4 (Lijiang, China, 2012), BOOTES-5 (San Pedro Mártir, México, 2015), BOOTES-6 (Boyden, Sudáfrica, 2021) y BOOTES-7 (San Pedro de Atacama, Chile, 2022).

Estación	Latitud	Longitud	Altura (m)	Emplazamiento
BOOTES-1	37°05'58.2''N	6°44'14.89''W	50	Mazagón
BOOTES-2	36°45'24.84''N	4°02'33.83''W	70	Algarrobo-Costa
BOOTES-3	45°02'22.92''S	169°41'0.6''E	360	Lauder
BOOTES-4	26°41'42.8''N	100°01'48.24''E	3200	Lijiang
BOOTES-5	31°02'39''N	115°27'49''W	2860	Baja California
BOOTES-6	29°02'20''S	26°24'13''E	1383	Maseespoort
BOOTES-7	22°57'09.8''S	68°10'48.7''W	2440	Atacama

Tabla 1. Las 7 estaciones de la Red Global BOOTES.

	B1A	B1B	B2	B3/4/5/6/7	CASANDRA
Tipo ^a	Ph	SC	RC	RC	Ph
Lente	400 mm + 135 mm	-	-	-	16 mm
Espejo	-	30 cm	60 cm	60 cm	-
Foco ^b	-	Ca	Ca	Ca	-
Focal	f/2.8 + f/2	f/10	f/8	f/8	f/2.8
CCD	4096x4096	512x512	1024x1024	1024x1024	4096x4096
Tesela	9 μm	16 μm	13 μm	13 μm	9 μm
Resolución Angular	4.39" + 13.2''	2''	0.59''	0.59''	2.2'
Campo de visión	5° × 5° + 15° × 15°	17'x17'	10'x10'	10'x10'	180°
Filtro ^c	C	C	g'r'i' C.R.ZY	u'g'r'i' C.ZY	C
Montura	Paramount ME	Paramount MX+	Astelco NTM-500	Astelco NTM-500	-
Cámara ^d	MG4	A887	A888	A888	MG4
Espectrógrafo	-	-	COLORES	-	-

^aPhotolens (Ph), Schmidt-Cassegrain (SC), Ritchey-Chretien (RC).

^bCassegrain focus (Ca).

^cClear (C).

^dMoravian G4-16000 (MG4), Andor iXon EMCCD DV887 (A887), Andor iXon X3 EMCCD, 888 (A888).

Tabla 2. Características de las 7 estaciones de la Red Global BOOTES.

BOOTES-5 (San Pedro Mártir, México, 2015, Figura 2), BOOTES-6 (Boyden, Sudáfrica, 2021, Figura 3) y BOOTES-7 (San Pedro de Atacama, Chile, 2022). Ver Tablas 1 y 2 para más detalles.

Con ello, el pasado 31 de diciembre de 2022 pudimos anunciar en círculos científicos y a principios de enero en la 241 reunión de la American Astronomical Society (en Seattle), que el IAA-CSIC había culminado el desarrollo de la Red BOOTES, logrando que España fuese el primer país en desplegar la primera red de telescopios robóticos con estaciones en los cinco continentes. Con instalaciones en España (dos estaciones), Nueva Zelanda, China, México, Sudáfrica y Chile, la Red Global BOOTES constituye la red más completa de su clase y un recurso único

y totalmente automatizado para combinar datos de instrumentos de todo el mundo, vigilar el cielo y apoyar las observaciones de misiones espaciales. Y así lo comunicamos en notas de prensa dadas a conocer simultáneamente en todos los países de la red el pasado 14 de febrero, teniendo amplia repercusión en nuestro país y dándose a conocer este logro en varios idiomas en otros países del globo.

BOOTES es pues, el resultado de casi veinticinco años de esfuerzo continuado, desde que en 1998 instalamos la primera estación en la sede del INTA en El Arenosillo, la primera institución que apoyó inicialmente el proyecto. El respaldo posterior del CSIC y la perfecta sinergia con la Universidad de Málaga, sustentado con financiación tanto estatal como



Figura 2. Dos de los telescopios de la Red Global BOOTES han sido bautizados con el nombre de reconocidos investigadores de nuestro país y muy vinculados a nuestro grupo de Astrofísica Robótica y de Altas Energías (ARAE) del IAA-CSIC, quienes nos dejaron en 2015 con sólo 3 meses de diferencia entre ellos. Uno de ellos es el Javier Gorosabel Telescope (JGT) en la estación BOOTES-5 en el Observatorio Astronómico de San Pedro Mártir (México). Fotografía: David Hiriart.

autonómica a lo largo de estos años, han hecho posible el despliegue completo, lo que supone un hito científico-tecnológico ya que se trata de la primera red robótica con presencia en todos los continentes. Ello la ha situado en el tiempo por delante de las redes americana (Las Cumbres), cuya estación asiática se halla aún en construcción, y rusa (Master), que carece de instalación en Oceanía.

TECNOLOGÍA

Desde el punto de vista instrumental, es de reseñar la cámara de todo el cielo CASANDRA-1, desarrollada por nuestro equipo en 2002 (Castro-Tirado et al. 2008) y que desde entonces viene recogiendo imágenes de la bóveda celeste cada 60 s alcanzando mag. 7 en el horizonte y 10 en el cénit y que constituyó en 2005 la

primera patente en la historia del Instituto de Astrofísica de Andalucía del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IAA-CSIC). Este diseño se replicó tanto en Cataluña como en Galicia, en colaboración con J. M. Trigo y J. A. Docobo respectivamente.

También merece la pena reseñar el espectrógrafo COLORES (*the COmpact LOw REsolution Spectrograph*), desarrollado en 2010 en colaboración con la Rep. Checa nuevamente. COLORES es un espectrógrafo ligero optimizado para objetos débiles, que permite en la estación BOOTES-2 tanto imagen directa (hasta mag. 20) como espectroscopía de rendija de baja resolución (entre 15-60 Å) para objetos de hasta mag. 16. COLORES supuso la tercera patente de la Red BOOTES (Rabaza et al. 2013).



Figura 3. El segundo de los telescopios de la Red Global BOOTES llamado en honor de otra insigne investigadora española es el bautizado como Mariló Pérez-Ramírez Telescope (MPRT), tomando el nombre de quien fuera profesora en la Universidad de Jaén, y que se ubica en la estación BOOTES-6 en el Observatorio Astronómico de Boyden (Sudáfrica). Fotografía: Emilio J. Fernández-García.

Uno de los subsistemas más importantes en todas las estaciones de la Red Global BOOTES es el habitáculo que alberga todo el instrumental. El techo del mismo, es abatible a dos aguas, que puede abrirse o cerrarse bajo la acción de motores eléctricos (salvo en BOOTES-2 en el que el sistema es hidráulico). Las dos mitades están diseñadas para abrirse completamente, lo que permite que el telescopio pueda acceder a cualquier parte del cielo, llegando incluso hasta poder apuntar al horizonte. Su apertura/cierre se hace en función de los ciclos día/noche y por supuesto, dependiendo de las condiciones meteorológicas, en función de los valores obtenidos en la estación meteorológica adyacente y el sensor de precipitación que la complementa, y todo bajo la supervisión de un controlador Zelio. Este diseño del habitáculo con techo abatible a dos aguas supuso en 2011 la segunda patente producida por el proyecto.

Recientemente, y en colaboración con la Universidad de Málaga, desarrollamos un sistema de disparo para poder marcar temporalmente ('time stamp') las imágenes obtenidas con las cámaras EMCCD con la máxima resolución temporal, lo que es fundamental para observaciones relacionadas con basura espacial. Esto ha resultado ser muy útil y ha constituido un modelo de utilidad concedido en 2021.

EL SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control es pieza fundamental en la Red Global BOOTES. Actualmente, se basa en una plataforma ASCOM que contiene una interfaz para comunicarse con el servidor ('host') del telescopio, en entorno del sistema operativo Windows. Cada estación BOOTES tiene una copia de este sistema instalada en su propio servidor. Este sistema está compuesto a su vez por tres subsistemas: 1) el Gestor de Objetos; 2) el Ejecutor de Observaciones y 3) el Controlador del Habitáculo. El Gestor de Objetos se está ejecutando en el servidor de cada estación de la Red BOOTES, servidor que ejecuta un programa para recibir alertas automáticamente y admite una interfaz de navegador web para la comunicación con los usuarios del telescopio. El Ejecutor de Observaciones es un programa escrito en lenguaje VisualBasic, que gobierna la montura del telescopio y llama al módulo MaxIm DL para operar la cámara EMCCD con el filtro en cuestión que se haya requerido. El módulo de enfoque, FocusMax, también se dirige con este software durante la observación,

enfocando una estrella cercana al polo celeste cada pocas horas, para asegurar imágenes en foco toda la noche. Mientras tanto, la hora universal calibrada y la información geográfica también son proporcionadas por el módulo GPS. Por último, el Controlador del Habitáculo es responsable de abrir y cerrar el techo abatible dependiendo de las condiciones ambientales y desempeña un papel fundamental como otros en este sistema para proteger el telescopio del mal tiempo, y asegura que las observaciones se pueden realizar sin peligro alguno para el instrumental que alberga.

Normalmente, hay dos modos de registro de observaciones en la Red Global BOOTES: 1) el modo ToO (*Target of Opportunity*), que tiene mayor prioridad, y 2) el modo Monitor. El modo ToO se activa cuando se recibe una nueva alerta en el servidor (host) y se asigna al objeto la máxima prioridad. Si la posición de dicho objeto es observable en ese mismo instante, el modo ToO interrumpirá el plan de observación actual. De lo contrario, este objeto será puesto en cola en la lista de observaciones pendientes hasta que su ventana temporal esté disponible. El segundo modo, modo Monitor, solo funciona cuando no hay ToO activados. En este modo Monitor, el telescopio ejecuta las observaciones conforme a la planificación de objetos hecha previamente en orden de sus prioridades para la comunidad científica, etc. Y es que cada telescopio de la Red puede ser accedido de manera independiente por cada usuario en cuestión, asignando las prioridades correspondientes a los objetos a observar, con los correspondientes detalles (filtros, tiempo de exposición, hora deseada de observación, si fuera el caso, etc.) (López-Casado et al. 2019). El mismo observador podrá acceder a los datos una vez hayan sido tomados, estando de antemano las imágenes ya calibradas en astrometría (WCS).

CIENCIA DE ALTO IMPACTO CON LA RED GLOBAL BOOTES

La Red Global BOOTES ha permitido significativos resultados en muy diversos campos científicos desde el Sistema Solar hasta Astrofísica Extragaláctica y de Ondas Gravitacionales. Son muchos grupos los que hacen uso de ella, tanto dentro como fuera de nuestro país. Comenzamos con una breve muestra de los diversos resultados científicos en orden ascendente de distancia del objeto de estudio en cuestión a la Tierra a sabiendas de que no podemos destacar todos, por cuestión de limitación de espacio.

Por cercanía, principiamos con la detección, por parte de las cámaras CASANDRA de todo el cielo, de un sinfín de actividad de diversos enjambres meteóricos y bólidos registrados que ha permitido, en el caso de la doble estación entre BOOTES-1 y BOOTES-2 (separadas 250 km) triangular numerosos eventos, y determinar, en colaboración con la Spanish Patrol Meteor Network (Trigo-Rodríguez et al. 2008) y la Red de Detección de Meteoros de la SMA-UMA, lugares de caída de posibles meteoritos en toda la geografía estatal.

Estas cámaras también han registrado algún bólido rozador e incluso un objeto que podríamos catalogar como un asteroide potencialmente peligroso (PHA) que el 25 de enero de 2016 tardó 45 min en

atravesar todo el campo de visión de la cámara de todo el cielo CASANDRA-1, pero cuya órbita no pudimos, por desgracia, determinar.

Sin salirnos del Sistema Solar, la detección de una ocultación de una estrella por parte de Plutón en 2015, permitió, dos semanas antes del paso por dicho planeta enano de la sonda *Pluto Flyby*, caracterizar la atmósfera en Plutón, gracias a los datos de excelente calidad obtenidos desde BOOTES-3 en Nueva Zelanda (Sicardy et al. 2016). Ver Figura 4.

Y ya en nuestra Vía Láctea, la detección de la descomunal fulguración (*superflare*) en tiempo real en 2014 del sistema binario DG CVn mientras se estaban tomando

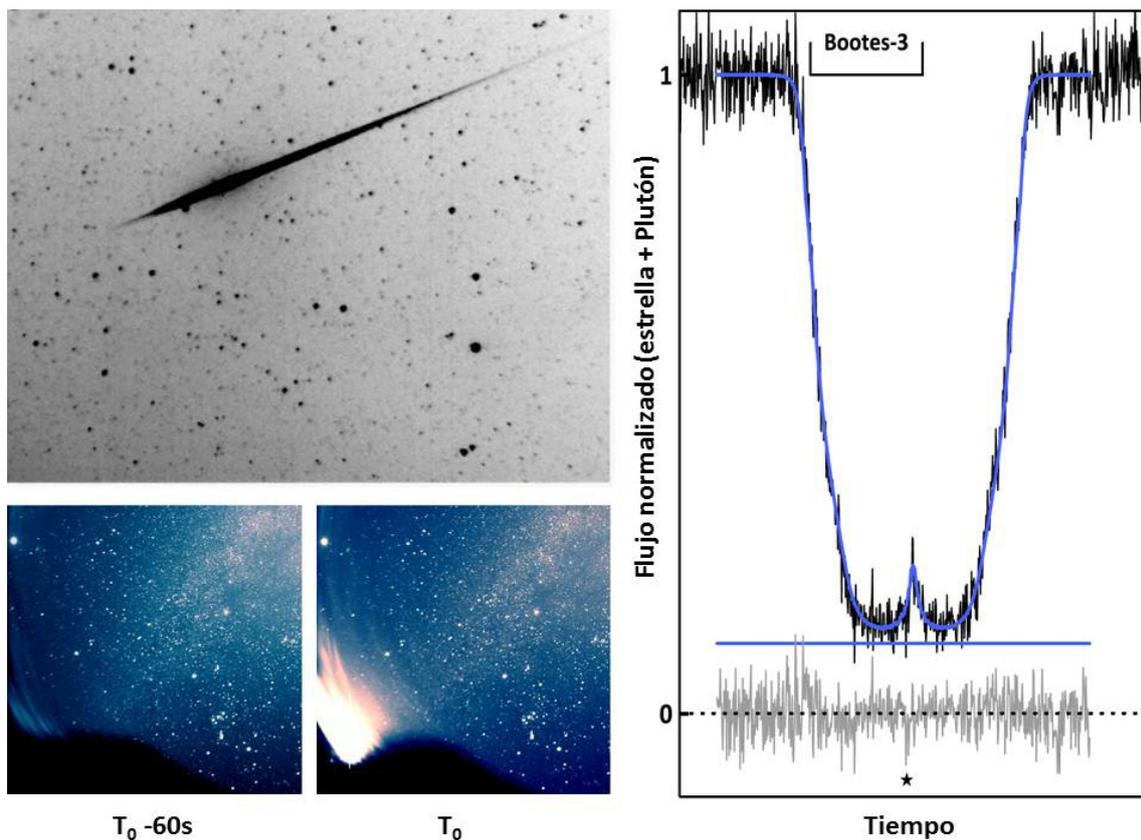


Figura 4. Ejemplos de resultados de la Red Global BOOTES en el Sistema Solar. Izda.: Detecciones de bólidos con las cámaras CASANDRA que registran imágenes del cielo cada 60 s, permitiendo determinación de zonas de caída de meteoritos en algunos casos, haciendo uso de la triangulación entre las estaciones BOOTES-1 y BOOTES-2 separadas 250 km. Dcha.: Curva de la luz de una estrella de fondo tras ser ocultada por Plutón en junio de 2015. La estación BOOTES-3 en Nueva Zelanda se encontraba justo en la prolongación de la hipotética línea que pasaba por los centros de los dos astros, permitiendo registrar el raro flash central en la base de la curva y caracterizar la atmósfera del planeta enano (Sicardy et al. 2016) antes del paso dos semanas después de la sonda *Pluto Flyby*.

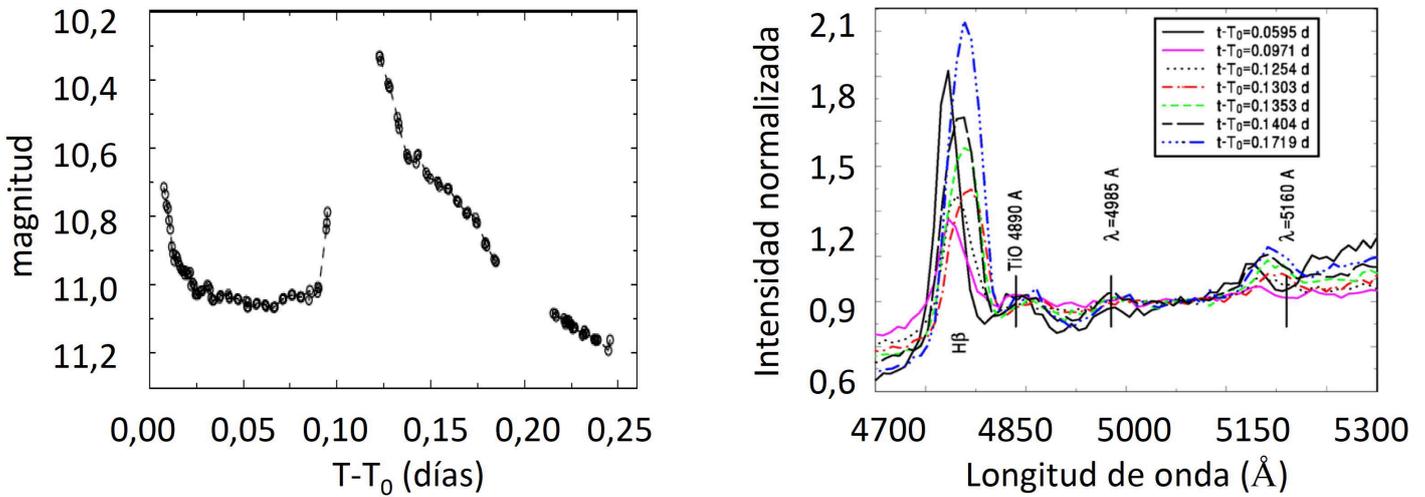


Figura 5. Un ejemplo de resultado de la Red Global BOOTES en Astronomía galáctica. Izda.: La curva de luz en el óptico de DG CVn que, tras la detección de la fulguración en rayos-X por el satélite *Swift*, mostró dos máximos en el óptico, con la fortuna que durante el segundo máximo acaecido 2,4 h tras el primero, BOOTES-2 (+COLORES) estaba ya tomando espectros de manera automatizada (incluido el autocentrado en la rendija de la fuente). Dcha.: La evolución espectral durante todo el episodio, a lo largo de 3,6 h. Se muestra solamente en el rango 4700-5300 Å, de todo el abarcado por COLORES (3900-10000 Å). Nótese la fuerte variación de las líneas de emisión. Más detalles en Caballero-García et al. (2015).

una serie de espectros con BOOTES-2 (+COLORES) simultáneamente a observaciones de alta energía, permitió modelizar en varias longitudes de onda el fenómeno (ver Figura 5) y confirmar la presencia de una o varias regiones activas en la enana roja que forma parte del sistema (Caballero-García et al. 2015).

BOOTES-4 contribuyó en 2020 a la caracterización de una fuente productora de ráfagas de radio de muy corta duración en nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, que se presentó en tres artículos en *Nature* que apuntaban a que un magnetar, una estrella de neutrones con un campo magnético muy intenso, se hallaría tras este fenómeno (Lin et al. 2020).

Ya fuera de nuestra galaxia, en 2021, BOOTES contribuyó al estudio, también publicado en *Nature*, de distintos pulsos en la llamada magnética gigante de una estrella de neutrones en la Galaxia de Escultor (NG 253): en apenas una décima de segundo, un magnetar liberó una energía equivalente a la que produce el Sol en cien mil años, y su análisis en detalle reveló múltiples pulsos en el pico de la erupción, que aportaron luz sobre estas aún poco conocidas llamadas magnéticas gigantes (Castro-Tirado et al. 2021).

Pero ha sido en el campo de los estallidos de rayos-gamma (GRBs), objetivo científico principal de la Red BOOTES, donde las observaciones de seguimiento rápido con BOOTES, desde los primeros segundos hasta las fases finales, han permitido restringir los modelos de este tipo de fenómenos, y también han contribuido a algunos resultados de alto impacto de los últimos años, habiéndose detectado más de 50 contrapartidas ópticas en un rango de corrimientos al rojo desde 0,078 hasta 5,91 (Jelínek et al. 2016, Gupta et al. 2021, Castro-Tirado et al. 2023). Ver Figura 6.

De hecho, uno de los observatorios de la Red, BOOTES-5 fue el único emplazamiento del hemisferio norte que logró observar en 2017 el evento conocido como GW170817, la quinta detección de la historia de ondas gravitatorias y asociado a un GRB de muy baja intensidad, sito todo ello en la galaxia NGC 4993 a 40 Mpc. El fenómeno responsable de esa emisión, la fusión de dos estrellas de neutrones, permitió el primer estudio simultáneo en luz y ondas gravitatorias por vez primera e inauguró una nueva era en la Astronomía (Abbott et al. 2017).

DIVULGACIÓN Y EDUCACIÓN

Aunque son muchas las iniciativas del uso de la Red para divulgación y educación, queremos reseñar la fuerte implicación de la misma en los proyectos GLORIA y ScienceIES.

GLORIA es un proyecto web-2.0 colaborativo, que fue financiado por el programa FP7 de la UE entre 2010 y 2013, basado en una red de telescopios robóticos de acceso libre (entre ellos varios de la Red BOOTES) que fue abierto al público y enfocado a la divulgación astronómica y sobre todo a Ciencia Ciudadana (Castro-Tirado et al. 2014).

ScienceIES es una forma distintiva de enseñar Astronomía y otras disciplinas científicas, centrándose en estudiantes de secundaria (de 15 a 17 años). ScienceIES es el nombre del proyecto iniciado en 2010 a nivel regional en Andalucía que une los sistemas educativos y científicos para involucrar a los estudiantes de último curso de Secundaria y primero de Bachillerato. Algunos de los proyectos de Astronomía se basan en el uso de telescopios robóticos, como ha sido el caso de BOOTES-2/TELMA, que se ha empleado por parte de los alumnos para hacer estudios de estrellas activas, binarias de rayos-X, galaxias del Grupo Local, etc. (Castro-Tirado et al. 2021), habiendo el alumnado previamente visitado in-situ la estación BOOTES-2, lo que les ha motivado sobremanera.

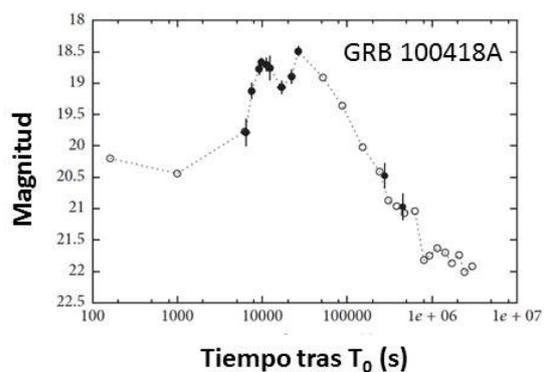
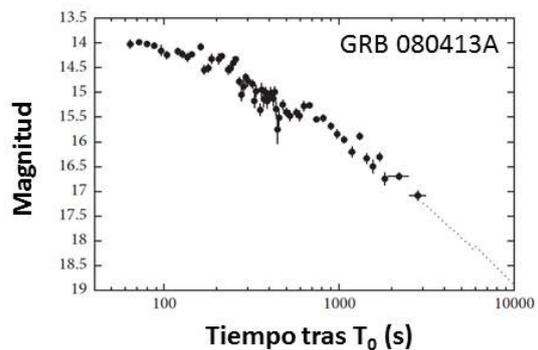


Figura 6. Ejemplos de resultados de la Red Global BOOTES en Astronomía extragaláctica. Izda.: La supernova SN2023ixf de tipo II descubierta el 20 de mayo en la galaxia M101 que está siendo monitoreada en todas las estaciones de la Red Global BOOTES en distintos filtros (crédito: Ignacio Pérez-García y Sergiy Guziy). Dcha.: Curva de luz de las postluminiscencias de dos GRBs: una más clásica, como en el caso de GRB 080413A y otra más atípica, reflejando una inyección de energía, en el caso de GRB 100418A (Jelinek et al. 2016).

CONCLUSIONES

Para el autor de esta contribución, la culminación de la Red Global BOOTES ha supuesto invertir 25 años de su vida en dicho proyecto. Sólo habiendo sido posible con el trabajo incansable de un equipo humano altamente implicado y que no ha desfallecido nunca, a pesar de no haber contado con financiación del Plan Nacional en dos años consecutivos y cuando la ha habido, en los últimos años, con un presupuesto muy inferior a los proyectos similares en otros países. En cualquier caso, hoy día, con cuatro estaciones en el hemisferio norte y tres en el hemisferio sur, siempre habrá al menos un telescopio de la Red BOOTES que cubra el cielo norte y sur, lo que redundará en una enorme eficacia en la detección de fuentes transitorias y fenómenos concretos, campos donde la Red ya ha demostrado su alta capacidad. Además, con todas las estaciones ya operativas, podemos coordinarlas como un único observatorio que cubra todo el planeta, cuyo potencial mostraremos a la comunidad internacional en el congreso de astrofísica robótica que celebraremos bianualmente y que tendrá lugar del 16 al 20 de octubre en Málaga (astrorob.iaa.es). Concebí el proyecto cuando desarrollaba mi tesis doctoral en Dinamarca hace treinta años, y para mí puedo decir con orgullo, que es un sueño hecho realidad.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo no hubiera sido posible sin la importantísima contribución del resto de maravillosos miembros de la actual colaboración de la Red BOOTES en nuestro país: Youdong Hu, Emilio Fernández-García, Ignacio Pérez-García, Francisco Rendón, Sergiy Guziy, María D. Caballero-García, Rubén Sánchez-Ramírez e Ignacio Olivares (todos IAA-CSIC Granada), Irene M. Carrasco-García (SMA, Málaga), Alberto Castellón, Carlos Pérez del Pulgar, Antonio J. Reina Terol y Sebastián Castillo-Carrión (todos de la Univ. de Málaga) y de las muchas otras personas implicadas en el INTA-CEDEA y en el IHSM La Mayora/UMA-CSIC. Tampoco hubiera sido posible sin los científicos y tecnólogos estantes en otros países de la red ni sin las personas involucradas estos años atrás (todos citados en bootes.iaa.es). El apoyo de las instituciones españolas (en orden cronológico del mismo): Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Universidad de Huelva (UHU), Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), Instituto de Hortofruticultura Subtropical

y Mediterránea La Mayora (IHSM/UMA-CSIC), Universidad de Valencia (UV) y Universidad de Málaga (UMA), también ha resultado fundamental, así como la financiación resultante de los distintos proyectos a nivel estatal (del Ministerio de turno con sus variables denominaciones en este tiempo) y autonómicos (de la Junta de Andalucía) y de los que ha bebido este proyecto durante estos 25 años. Y por supuesto, sin el apoyo continuado todos estos años de mi familia: padres, hermanos, esposa e hijo, a quienes tanto debo.

REFERENCIAS

- B.P. Abbott et al. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. *The Astrophysical Journal* 848, L12 (2017). <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/aa91c9/pdf>
- M.D. Caballero-García et al. Early optical follow-up of the nearby active star DG CVn during its 2014 superflare. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 452, 4195 (2015) academic.oup.com/mnras/article/452/4/4195/1062524
- A.J. Castro-Tirado et al. The Burst Observer and Optical Transient Exploring System (BOOTES). *Supplement* 138, 583 (1998). DOI: <https://doi.org/10.1051/aas:1999362>
- A.J. Castro-Tirado et al. A very sensitive all-sky CCD camera for continuous recording of the night sky. *Advanced Software and Control for Astronomy II*. Edited by Bridger, Alan; Radziwill, Nicole M. *Proceedings of the SPIE*, Volume 7019, article id. 70191V, 9 pp. (2008). <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/7019/1/A-very-sensitive-all-sky-CCD-camera-for-continuous-recording/10.1117/12.789361.short>
- A.J. Castro-Tirado et al. The Global Robotic Telescopes Intelligent Array for e-Science (GLORIA), *Rev. Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)*, 45, 104 (2014) http://www.astroscu.unam.mx/rmaa/RMxAC..45/PDF/RMxAC..45_file7-01.pdf
- A.J. Castro-Tirado et al. Very-high-frequency oscillations in the main peak of a magnetar giant flare. *Nature* 600, 621 (2020) <https://www.nature.com/articles/s41586-021-04101-1>
- A.J. Castro-Tirado et al. The Use of Robotic Telescopes in the Science-IES Project in Spain. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)* 53, 151 (2021) http://www.astroscu.unam.mx/rmaa/RMxAC..53/PDF/RMxAC..53_Castro-Tirado-Caceres-XXIX.pdf

El autor de esta contribución, el día 14 de febrero de 2023, cuando se anunció la completitud de la Red Global BOOTES, junto al astrógrafo de 28 cm de diámetro del observatorio BOOTES-1, sito en la Estación de Sondeos Atmosféricos del INTA-CEDEA en Mazagón (Huelva). Fotografía: Beatriz Lucía Montes Cantero.



- A.J. Castro-Tirado et al. GRB 130606A within a low metallicity sub-DLA at redshift 5.91, *Astronomy and Astrophysics*, en prensa (2023). <https://arxiv.org/pdf/1312.5631.pdf>
- R. Gupta et al. Observational Properties of TeV detected GRB 180720B and GRB 190829A. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)* 53, 113 (2021). http://www.astroscu.unam.mx/rmaa/RMxAC..53/PDF/RMxAC..53_Gupta-XXII.pdf
- Y.-D. Hu et al. The Burst Observer and Optical Transient Exploring System in the multi-messenger astronomy era. *Frontiers in Astronomy* 10, 2887H (2023). DOI: [10.3389/fspas.2023.952887](https://doi.org/10.3389/fspas.2023.952887)
- M. Jelínek et al. A Decade of GRB Follow-Up by BOOTES in Spain (2003–2013) *Advances in Astronomy* 2016, 1928465 (2016). <https://www.hindawi.com/journals/aa/2016/1928465/>
- L. Lin et al. No pulsed radio emission during a bursting phase of a Galactic magnetar, *Nature* 587, 63 (2020). <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2839-y>
- M. C. López-Casado et al. Observation scheduling and simulation in a global telescope network. *Future Generation Computer Systems* 95, 116 (2019). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X18317503>
- O. Rabaza et al. Compact low resolution spectrograph, an imaging and long slit spectrograph for robotic telescopes. *Review of Scientific Instruments* 84, 114501-114501-9 (2013). <https://pubs.aip.org/aip/rsi/article/84/11/114501/358750/Compact-low-resolution-spectrograph-an-imaging-and>
- B. Sicardy et al. Pluto's Atmosphere from the 2015 June 29 Ground-based Stellar Occultation at the Time of the New Horizons Flyby, *Astrophysical Journal* 819, L38 (2016). <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8205/819/2/L38>
- J. M. Trigo-Rodríguez et al. 2007 fireball activity imaged by the Spanish Fireball Network: identifying meteorite delivery sources. *European Planetary Science Congress 2008, Proceedings of the conference held 21-25 September, 2008 in Münster, Germany*, p. 727 (2008). <http://meetings.copernicus.org/eps2008>

ESPECTROSCOPÍA AL LÍMITE: MODELADO

Durante los últimos diez años, la astrofísica ha entrado en una lujosa era de disponibilidad pública de datos. Prácticamente todas las misiones espaciales y telescopios terrestres modernos incluyen en sus presupuestos costosos centros de distribución de datos, garantizando así, el acceso de toda la comunidad científica a los mismos. Dado que es prácticamente imposible diseñar un instrumento o telescopio que pueda operar de forma óptima en rangos muy amplios de longitud de onda, normalmente cada instrumento está optimizado para trabajar en una región relativamente estrecha del espectro. En consecuencia, para obtener una cobertura abundante de líneas espectrales, muchos estudios han combinado datos procedentes de diferentes telescopios o misiones.



Jaime de la Cruz Rodríguez
jaime@astro.su.se

Adur Pastor Yabar
adur.pastor@astro.su.se

Roberta Morosin
morosin.roberta@gmail.com

Institute for Solar Physics, Stockholm University

En muchos casos, los objetos a estudiar evolucionan en escalas temporales muy grandes (por ejemplo, observaciones de galaxias o del medio interestelar) y, por lo tanto, estas observaciones no tienen que ser estrictamente simultáneas. Sin embargo, cuando se trata de eventos u objetos transitorios, las observaciones deben ser tomadas de forma simultánea por todos los telescopios (por ejemplo, observaciones de explosiones supernova o del Sol) y esto es mucho más complicado de obtener. Sin embargo, el esfuerzo de coordinar varios observatorios para obtener información en diferentes partes del espectro merece la pena. Por ejemplo, en el caso de observaciones solares, solamente hay unas pocas líneas en el visible que son sensibles a la cromosfera. Pero si nos vamos al ultravioleta, encontramos líneas como Mg II h&k que además nos dan información de la alta cromosfera y de la región de transición con la corona.

Uno de los principales problemas que se pueden encontrar al intentar interpretar este tipo de conjuntos de datos es la discrepancia de la resolución espacial entre las diferentes regiones espectrales, dado que cada instrumento / telescopio nos proporcionará una resolución diferente. Para hacer estudios cualitativos, podemos simplemente hacer un mapeado de los datos de baja resolución a la malla de más alta resolución. Pero en el momento en que queramos hacer un modelado conjunto de los datos, vamos a ver una discrepancia entre la predicción del modelo y los datos, dado que los píxeles de los datos de más baja resolución representan un promediado espacial más extenso en la superficie del objeto. La Ilustración 1 muestra un ejemplo de co-observación en el visible con el Telescopio Solar Sueco (SST, Scharmer et al. 2003) y el ultravioleta con el satélite de la NASA IRIS (de Pontieu et al. 2014). La discrepancia de resolución es de aproximadamente un factor 4.42.

Uno de los métodos más empleados a la hora de interpretar este tipo de observaciones son los conocidos como métodos de *inversión* de los datos. Estos métodos nos permiten reconstruir los parámetros físicos de un modelo de atmósfera a lo largo de la línea de visión ajustando el espectro observado en cada píxel. Normalmente, estos códigos han asumido que el espectro de cada punto del campo de visión puede ser modelado de forma independiente del resto de puntos de su entorno, bajo la hipótesis de que no existe ningún

MULTI-RESOLUCIÓN DE OBSERVACIONES

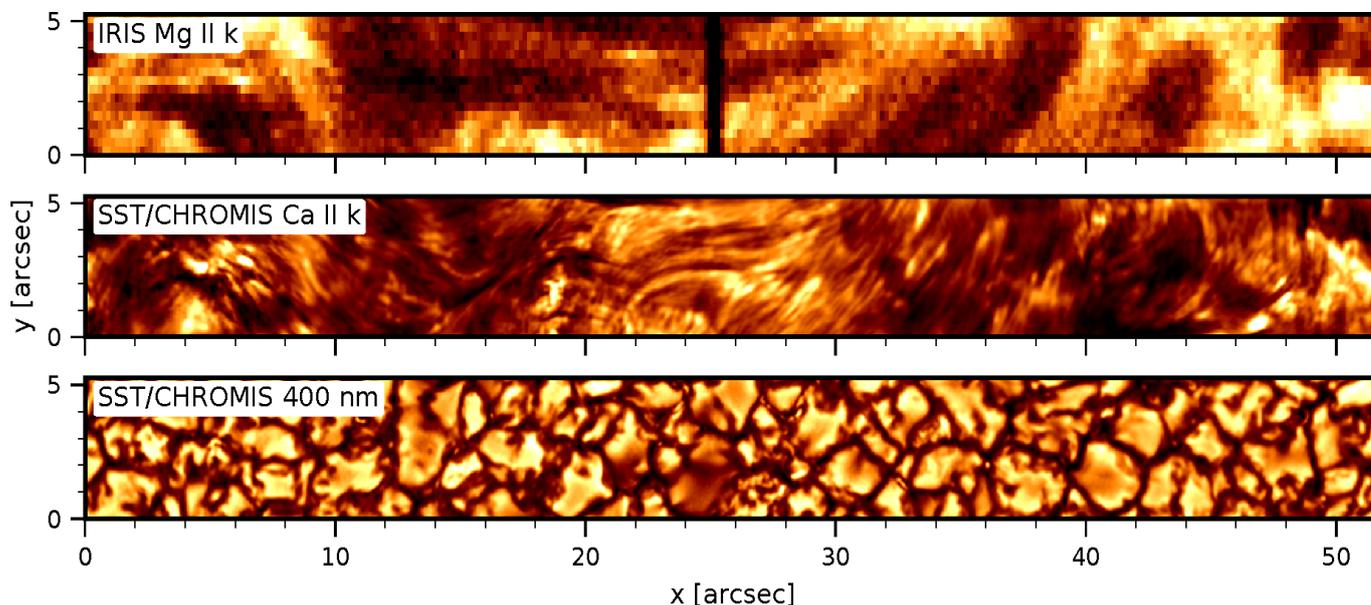
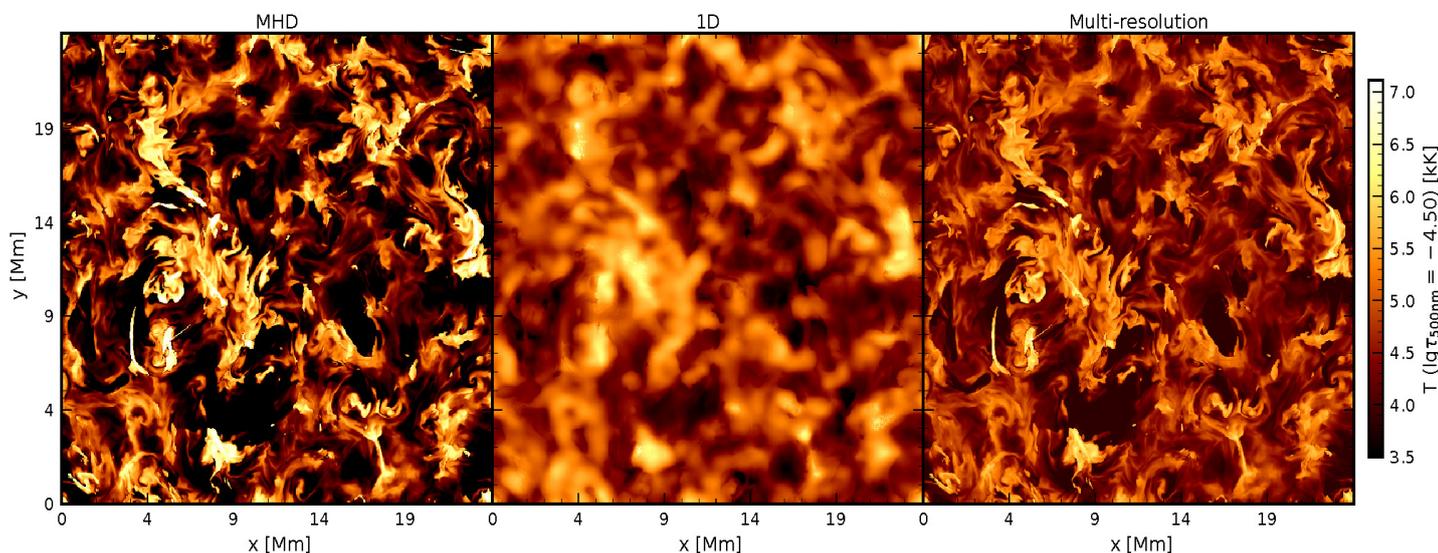


Ilustración 1. Co-observación de la fotosfera y cromosfera de una región de Sol en calma. La línea de Mg II k (279.7 nm) ha sido observada desde el espacio con el satélite IRIS de la NASA. La línea de Ca II K (393.4 nm) y el continuo en 400 nm han sido observados con el instrumento CHROMIS en el Telescopio Solar Sueco de 1m (SST, Observatorio del Roque de los Muchachos). La resolución espacial de IRIS es 0.16", mientras que la resolución espacial de CHROMIS es 0.038".

Ilustración 2. Reconstrucción de la temperatura cromosférica a partir de datos sintéticos, generados a partir de una simulación 3D MHD. Hemos simulado una co-observación con el Telescopio Solar Sueco en Ca II K, Ca II 854.2 nm, Fe I 630.1/630.2 nm y en las líneas de Mg II h&k con IRIS. El panel de la izquierda muestra la temperatura real del modelo original. El panel central muestra el resultado de una inversión en la que los datos de IRIS han sido re-interpolados a la malla de las observaciones de CHROMIS e invertidos conjuntamente. El panel de la derecha muestra los resultados de nuestra nueva inversión multi-resolución, que minimiza el emborronamiento de este tipo de inversiones.



acoplamiento físico o instrumental. Esta aproximación, a priori razonable, desacopla y simplifica enormemente el proceso de modelado ya que podemos procesar un campo de visión de forma masivamente paralela.

Una discrepancia de resolución en las diferentes ventanas espectrales de los datos, suele conllevar que el modelo reconstruido sólo alcanza la resolución de la ventana espectral con peor resolución espacial y, además, pueden aparecer artefactos, ya que el código podría no ajustar bien las diferentes ventanas espectrales (Vissers, G. J. M. et al. 2019). La Ilustración 2 muestra un ejemplo de este efecto. En ella, hemos preparado una simulación de los datos que se obtendrían de una co-observación típica utilizando SST y IRIS. En cada punto de esa imagen tenemos un espectro espacialmente resuelto de Ca II K, Mg II k, Ca II 854.2 nm y Fe I 617.3 nm. Tras aplicar una inversión NLTE *tradicional* a estos datos sintéticos, obtenemos, entre otros, la temperatura, de la que mostramos un corte horizontal en la cromosfera en el panel central de la Ilustración. En ella, se aprecia como la presencia de los datos de IRIS, que simplemente han sido re-interpolados a la malla de SST, emborrona la reconstrucción de la temperatura en la cromosfera si no se tiene en cuenta el efecto de la discrepancia de resolución.

Para tener en cuenta esta discrepancia, hemos desarrollado un método, basado en el algoritmo de Levenberg-Marquardt para ajustes no-lineales, que incluye en el modelo todos los procesos de muestreo, degradación y rotación que sufre el haz de luz desde que entra en el telescopio hasta que llega al detector (de la Cruz Rodríguez, J. 2019). La idea se basa en la inclusión de un operador lineal de degradación espacial en la definición de la función de mérito a minimizar:

$$\chi^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_s} N_j} \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{(o_i - \mathbf{D}_j \cdot \mathbf{s}_i)^2}{\sigma_i^2},$$

donde, N_s es el número de ventanas espectrales, N_j es el número de mediciones dentro de una ventana espectral, \mathbf{D}_j es el operador total de degradación, que actúa sobre los datos sintéticos \mathbf{s}_i en todo el campo de visión para esa longitud de onda y σ_i es la estimación del nivel de ruido. El acoplamiento espacial se introduce en el producto $\mathbf{D}_j \cdot \mathbf{s}_i$, dado que el espectro sintético se genera a partir de los parámetros físicos del modelo que estamos reconstruyendo.

Estos operadores lineales son matrices en las que cada fila representa un punto degradado en la salida y cada columna representa cómo este punto está afectado por los parámetros del resto del campo de visión. La Ilustración 3 muestra varios ejemplos de estos operadores y cómo pueden combinarse con un simple producto matricial. El principal efecto de introducir operadores que acoplan la solución de diferentes puntos es que la inversión se convierte en un problema global, y las correcciones deben calcularse de forma simultánea para todo el campo.

Bajo esta aproximación, el sistema lineal que debemos resolver en cada iteración tiene dimensiones $(n_x \times n_y \times n_p)^2$, aunque la matriz puede ser relativamente dispersa. De esta forma, un campo de visión con 256 puntos en cada dirección y 5 parámetros libres implica resolver un sistema de ecuaciones con 327680^2 elementos (800 GB en doble precisión si todos los elementos son no-ceros que debemos almacenar en la RAM), que debe resolverse de forma iterativa (usando métodos como GMRES o BiCGStab).

Lidiar con estos sistemas requiere un esfuerzo titánico, tanto a la hora de construirlos como de resolverlos, pero tiene su recompensa como se desprende del panel de la derecha de la Ilustración 2. Para su obtención, hemos realizado una inversión multi-resolución en la que hemos incluido en el proceso de modelado la degradación de cada región espectral, incluyendo la PSF del telescopio de IRIS. La mejora en los modelos ajustados es, a nuestro parecer, impresionante, siendo esta nueva inversión, capaz de recuperar las estructuras de pequeña escala que la inversión tradicional (panel central) es incapaz de resolver. De hecho, una vez que tenemos el modelo final, podemos sintetizar el espectro en todas las ventanas espectrales sin incluir los procesos de degradado. Por tanto, este tipo de reconstrucción en el que incluimos la PSF puede entenderse como una de-convolución de los datos a través de un modelo de atmósfera estelar, dado que el modelo ha sido derivado compensando el efecto de la PSF. La ventaja es que los datos sintéticos no contienen el ruido de la observación (aunque la reconstrucción del modelo sí está afectada por el ruido). La Ilustración 4 muestra resultados de una inversión con datos reales de un grupo de datos adquirido con IRIS y con el SST. En este caso, los datos de Mg II k tienen una resolución (panel c) mucho más baja que los del resto de líneas (panel f).

En este contexto es posible que surja la pregunta, ¿por qué queremos obtener modelos de tan alta resolución espacial? La respuesta es que hay muchas aplicaciones en las que se requiere alta resolución espacial. Por ejemplo, para derivar metalicidades o la edad de las estrellas de un cúmulo de estrellas se querrá resolver (separar) la información de cada una de las estrellas. O para estudiar regiones de formación estelar en observaciones de galaxias, podríamos combinar datos obtenidos en la línea de Lyman α y H α de forma simultánea. En nuestro caso, la principal motivación es el estudio de la disipación o deposición de energía en la cromosfera del Sol. El hecho de tener en cuenta la degradación instrumen-

tal permite, por una parte, ajustar los observables sin necesidad de modificarlos (por ejemplo, a través de operaciones de deconvolución o interpolación), y a la vez, encontrar el modelo (la solución) que es compatible simultáneamente con todos los observables.

La fotosfera y la cromosfera solar no están en equilibrio radiativo ya que, si lo estuviesen, la cromosfera estaría mucho más fría de lo que las observaciones sugieren. Éste constituye lo que se conoce como el *problema del calentamiento cromosférico*. Además, dado que el transporte energético por convección termina en la base de la fotosfera, debe de haber otros procesos físicos que transportan y depositan la energía en la cromosfera

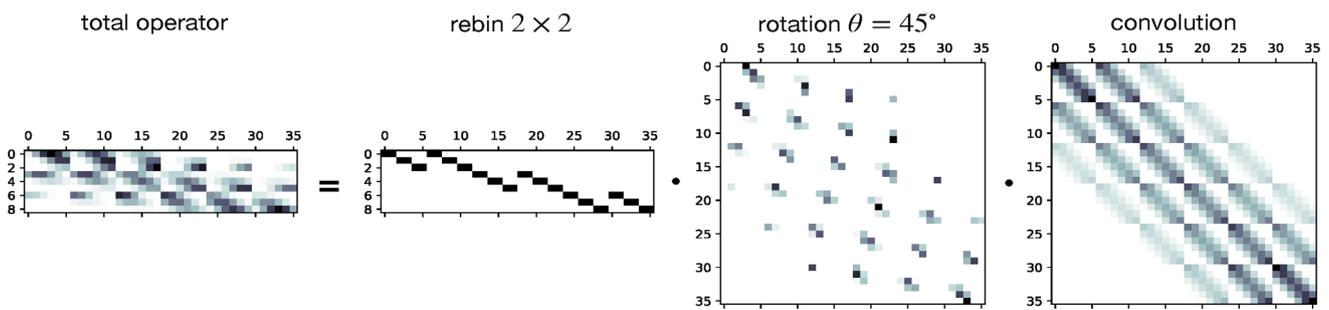


Ilustración 3. Operadores lineales de transformación. En este ejemplo, el operador total es el resultado de combinar una convolución con la PSF del telescopio, una rotación y un promediado de 2x2 puntos. En este ejemplo hemos asumido un campo de visión de 6x6 (=36) puntos antes del promediado (binning).

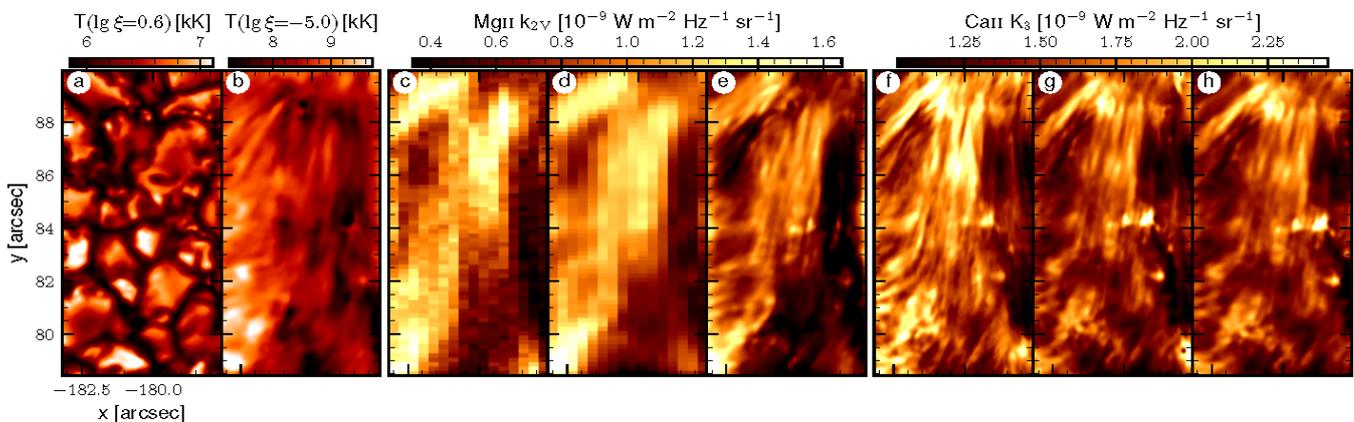


Ilustración 4. Inversión multiresolución de un grupo de datos observado con el Telescopio Solar Sueco y el satélite IRIS de la NASA. Los paneles de la izquierda muestran la reconstrucción de la temperatura en la fotosfera y cromosfera. Los paneles centrales muestran una imagen monocromática observada en el centro de la línea de Mg I k (centro-izquierda), la predicción de la inversión multiresolución (centro-centro) y la predicción de la inversión sin degradar (centro-derecha). Los paneles de la derecha muestran la intensidad monocromática observada en el centro de la línea de Ca II K (derecha-derecha), la predicción de la inversión emborronada (derecha-centro) y la predicción sin emborronar (derecha-derecha). En este último caso, ambas predicciones son iguales porque el modelo viene dado en la malla de los datos de Ca II K.

(a parte del transporte por radiación que también contribuye, pero no es suficiente). El problema actualmente ha evolucionado, ya que se han propuesto muchos mecanismos que probablemente contribuyen a transportar y depositar energía: difusión ambipolar, disipación Óhmica, transporte por ondas y frentes de choque, reconexión magnética, y muchos más. Así, la pregunta en la actualidad ha evolucionado a *¿en qué medida contribuye cada uno de estos procesos en las diferentes estructuras de la cromosfera?* Dado que en todos estos procesos la disipación de energía ocurre a muy pequeña escala, este problema sólo puede estudiarse con observaciones de muy alta resolución espacial.

Por ejemplo, bajo la aproximación magneto-hidrodinámica, podemos escribir algunos de los procesos que disipan energía en términos de un producto de una difusividad por un término proporcional a la corriente eléctrica. Las corrientes eléctricas aparecen en la atmósfera solar cuando el campo magnético cambia mucho en escalas espaciales pequeñas y suele formar *cortinas* o *láminas* que normalmente denominamos *lámina de corriente eléctrica*. Matemáticamente el vector de corriente eléctrica (\mathbf{J}) viene dado por $\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{B} / \mu_0$, donde \mathbf{B} es el vector de campo magnético y μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío. Cuando dos parches magnéticos con polaridades opuestas entran en contacto, también se forma una lámina de corriente dado que por definición el gradiente del campo es enorme en la superficie de contacto.

En este sentido, podemos escribir la disipación Óhmica como $Q_o = \eta_o \mathbf{J}^2$, donde η_o es el coeficiente de difusión Óhmica. Igualmente, podemos describir la disipación por colisiones entre átomos neutros con partículas cargadas (difusión ambipolar) como $Q_a = \eta_a \mathbf{J}_\perp^2$, donde η_a es el coeficiente de difusión ambipolar y \mathbf{J}_\perp es la componente perpendicular a la dirección del campo magnético. La Ilustración 5 muestra mapas del coeficiente de difusión ambipolar y Óhmica en la cromosfera de una región activa que contiene bucles cromosféricos (Morosin, R. et al. en prep.). Aunque en este caso no hemos mostrado información del vector de corriente eléctrica, la distribución presentada en esos mapas sugiere que la difusión ambipolar podría jugar un papel más importante que la difusión Óhmica en este tipo de estructuras. Sin embargo, mientras que las difusividades dependen típicamente de la densidad, densidad electrónica y del grado de ionización del plasma, el vector de corriente

eléctrica depende de las derivadas espaciales del campo magnético. Y aquí es donde nuestro método es de vital importancia, ya que optimiza la resolución espacial de los modelos reconstruidos en la inversión.

La principal limitación que tenemos en estos momentos es que todos los códigos de inversión NLTE que existen actualmente operan en una malla vertical de profundidad óptica o de columna de masa. Además, no se impone un equilibrio de presiones horizontal, por lo que no se pueden calcular estas derivadas espaciales del vector de campo magnético para estimar el vector de corriente eléctrica. Muy recientemente, Pastor Yabar et al. (2021) demostraron, usando un código de inversión LTE en la fotosfera, que se puede reemplazar la imposición de equilibrio hidrostático por equilibrio magneto-hidrostático, que además permite de forma natural trabajar en mallas cartesianas y garantiza equilibrio de presiones horizontal (véase la Ilustración 6).

Actualmente estamos trabajando en la implementación de una técnica similar en nuestro código de inversión NLTE para poder finalmente empezar a estimar y separar las contribuciones de los diferentes modos de calentamiento cromosférico en el Sol. Este proyecto está financiado por ERC a través de los prestigiosos programas Starting (2017, SUN-MAG) y Consolidator (2023, MAGHEAT).

REFERENCIAS

- de la Cruz Rodríguez, J.; A method for global inversion of multi-resolution solar data; 2019; A&A 631, A153
- De Pontieu, B., Title, A. M., et al.; The Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS); 2014; SoPh 289, 2733
- Morosin, R., de la Cruz Rodríguez, J., et al.; Reconstruction of the magnetic field vector in chromospheric loops; in prep
- Pastor Yabar, A., Borrero, J. M., et al.; Inference of electric currents in the solar photosphere; 2021; A&A 656, L20
- Scharmer, Goran B., Bjelksjo, Klas, et al.; The 1-meter Swedish solar telescope; 2003; SPIE 4853, 341
- Vissers, G. J. M., de la Cruz Rodríguez, J., et al.; Dissecting bombs and bursts: non-LTE inversions of low-atmosphere reconnection in SST and IRIS observations; 2019; A&A 627, A101

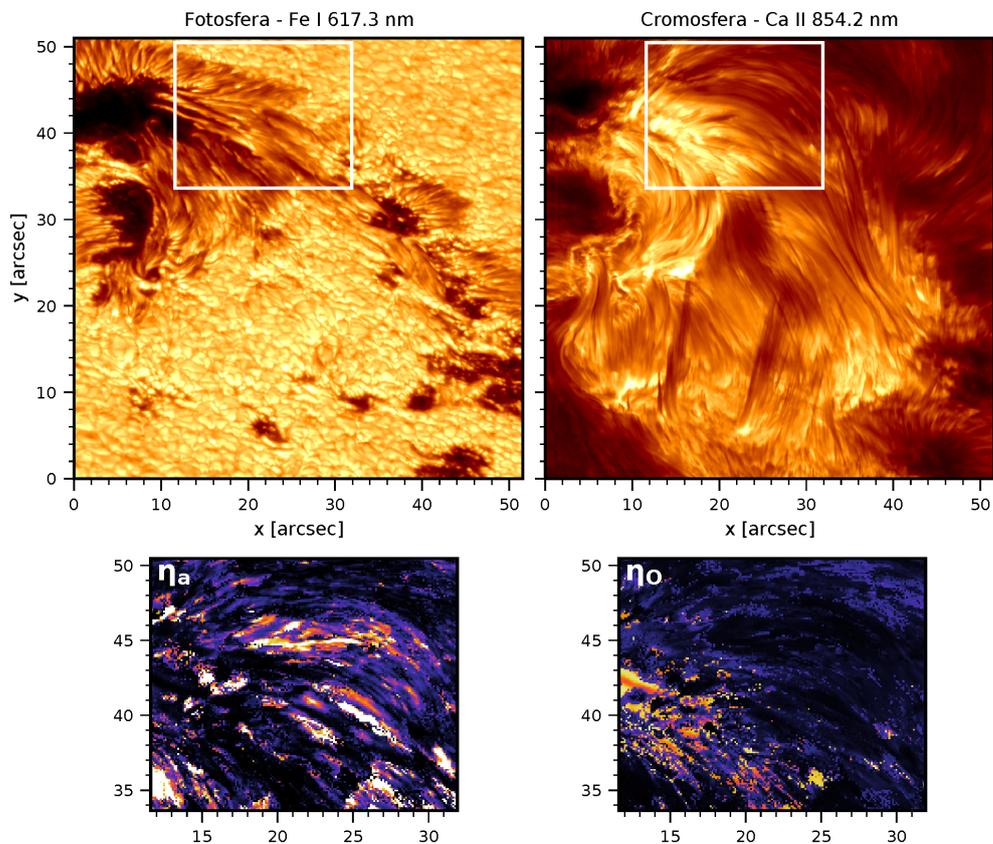
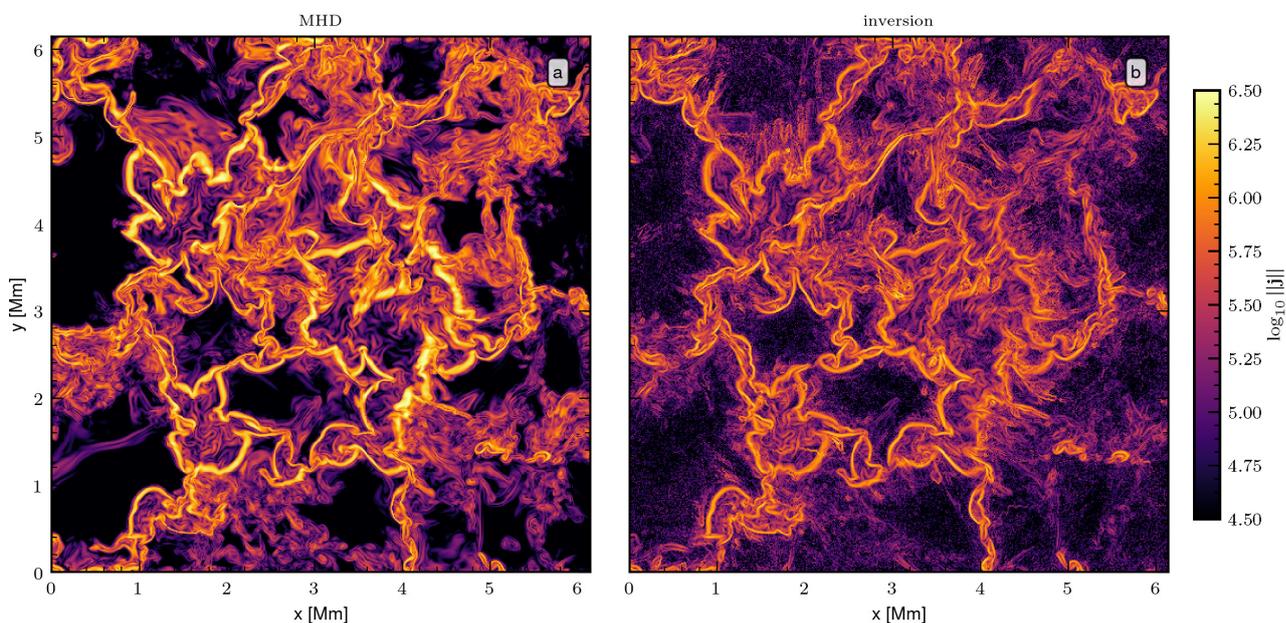


Ilustración 5. Coeficientes de difusión ambipolar (inferior-izquierda) y de difusión Óhmica (inferior-derecha) en la cromosfera de una región activa que incluye bucles cromosféricos. La reconstrucción se ha llevado a cabo con el código de inversión STiC usando datos adquiridos en las líneas de Fe I 617.3 nm (panel superior-izquierdo) y de Ca II 854.2 nm (panel superior-derecho) con el Telescopio Solar Sueco. Los paneles superiores muestran el campo de visión observado, donde el campo de visión que hemos procesado aparece marcado con un rectángulo blanco.

Ilustración 6. Reconstrucción del módulo del vector corriente eléctrica, a partir de una inversión magneto-hidrostática LTE en la fotosfera solar, a partir de datos simulados. El panel de la izquierda muestra las corrientes en una simulación numérica que se ha utilizado para simular los datos. El panel de la derecha muestra la reconstrucción obtenida con el código de inversión. Figura adaptada de Pastor Yabar et al. (2021).



TODOS LOS 11 DE FEBRERO CUENTAN

La Comisión de Igualdad y Diversidad del IFCA ha dedicado la quinta edición de su concurso de cómics a las mujeres astrónomas, con una inesperada acogida.

El 11 de febrero se celebra el Día Internacional de las Mujeres y las Niñas en la Ciencia y, en línea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 5, el **Instituto de Física de Cantabria (IFCA)**, centro mixto del Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universidad de Cantabria (UC), organiza cada año actividades dirigidas a todos los públicos para contribuir a la reducción de la brecha de género en los sectores STEM y que las niñas conozcan a científicas referentes.



Rebeca G. García
Instituto de Física de Cantabria
difusion@ifca.unican.es

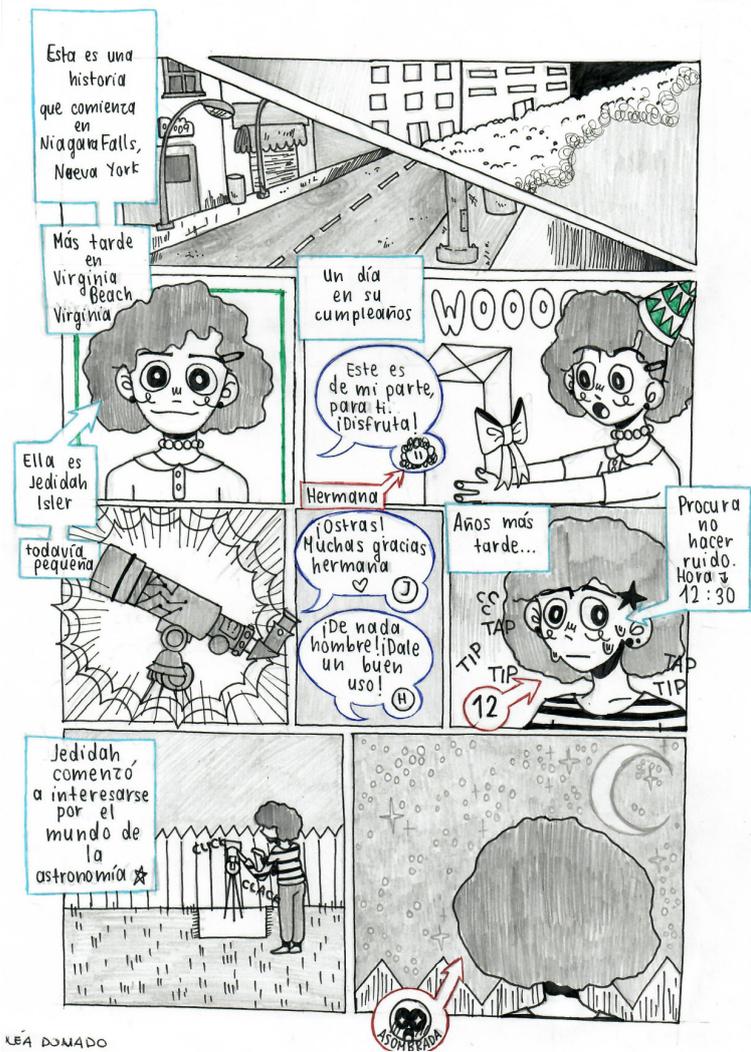
Pero, ¿por qué hacemos esto? Desde la **Comisión de Igualdad y Diversidad del IFCA** creemos firmemente que la presencia de mujeres en determinadas carreras científicas, como las Ciencias Físicas, continúa siendo muy inferior a la de los hombres y, a pesar de que el número de mujeres en puestos científicos se ha incrementado, **la proporción de catedráticas y profesoras de investigación representa aproximadamente un 30%** (*Científicas en cifras*), muy alejado de la mitad. Por eso son importantes iniciativas que busquen fomentar las vocaciones científicas entre las niñas y resaltar el trabajo de las mujeres que se dedican a la ciencia. **Por eso, todos los 11 de febrero cuentan.**

En concreto con nuestras actividades ya consolidadas en torno al mes de febrero pretendemos inspirar y promover la participación de estas mujeres y niñas, que cambien sus prejuicios y estereotipos de género y resaltar las figuras de científicas que para ellas sean referentes.

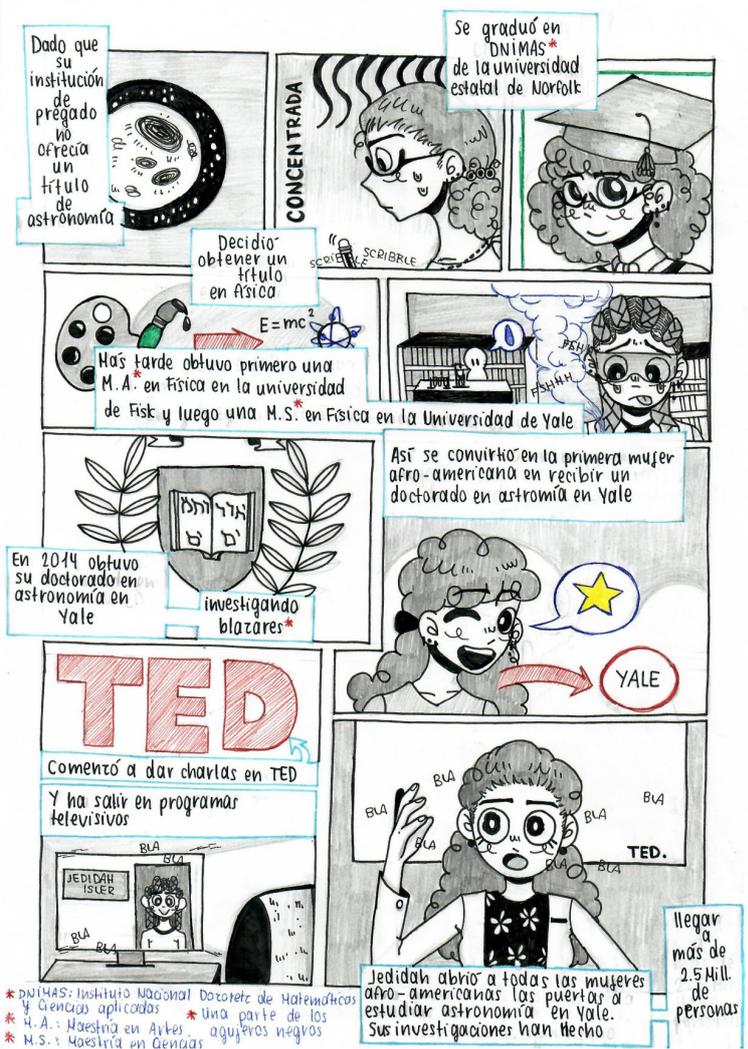
Por estos motivos, desde el año 2018 organizamos el concurso de cómics IFCA, para visibilizar a las mujeres científicas y su trabajo. En su quinta edición en 2022, **inspiradas por la exposición virtual AstrónomAs**, quisimos dedicar la temática de los dibujos a las mujeres que han dedicado y dedican sus noches y sus días al estudio de la Astronomía. Para ello, invitamos al alumnado de secundaria (1º a 4º de ESO o FP Básica) a que, en un máximo de 20 viñetas, nos contaran e ilustraran el trabajo de investigación astronómica de una científica, o cualquier anécdota o testimonio vinculado con la investigación del Universo.

La participación fue un éxito, recibimos en torno a **300 trabajos** (no teníamos suficientes paneles para colocarlos todos). Aún no sabemos el motivo, pero estamos muy contentas con que así fuera. La ganadora del concurso fue una alumna andaluza de 2º de ESO, **Lea Donado Bo-Boliko**, del Colegio Adharaz-Altasierra de Sevilla que nos dijo: “he descubierto un gran número de mujeres que me han abierto los ojos a los misterios de la Astronomía”. Sólo por esas palabras, ya había merecido la pena.

El premio no fue sólo para la ganadora. En este concurso creemos que todas y todos los que participan se merecen conocer a referentes y escuchar sus vivencias, por ello les invitamos a una **visita VIP al**



LEA DONADO



Cómic ganador sobre Jedidah Isler, astrofísica y primera mujer afroamericana en convertirse en Doctora en astrofísica, en Yale en 2014. / Lea Donado Bo-Boliko

IFCA. Conocieron a la astrofísica del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), **Isabel Márquez** y a las investigadoras del IFCA (CSIC-UC), **Maite Ceballos**, **Silvia Martínez**, **Rosa Domínguez**, **Amalia Corral**, **Koushika Vaiyapurja** y **Beatriz Cobo**, del grupo de Galaxias y AGNs, que les contaron sus inicios en la física, les mostraron las líneas de investigación en las que trabajan, y los distintos proyectos donde participan.

Otras iniciativas que realizamos desde el IFCA en torno al 11 de febrero muestran los trabajos y las investigaciones realizadas por mujeres científicas y tecnólogas. Estos eventos dan a conocer los avances y descubrimientos que ellas están realizando en diferentes áreas del conocimiento. Son el ciclo de charlas '**Ateneas**', en colaboración con el Ateneo de Santander y la RSEF; las **proyecciones con perspec-**

tiva de género en la Filmoteca de Santander, y las charlas de '**Expandiendo la ciencia, especial 11F**', donde nuestras compañeras investigadoras se acercan a los centros educativos de Cantabria que así lo solicitan para ofrecerles las charlas: '**A hombros de GigantAs**' y '**Científicas en el cine**'.

Reiteramos que es importante que continuemos trabajando desde los centros de investigación, universidades, organismos públicos y empresas, para lograr una **mayor inclusión y equidad real** entre mujeres y hombres en la ciencia, y este día es un paso importante en esa dirección.

Ojalá que haya un día en que no tengamos que conmemorar ningún 11 de febrero y que se convierta en un día más de nuestro calendario.



Visita a la azotea del IFCA para conocer los telescopios

ASTRÓNOMAS

V Concurso de Cómics del
Instituto de Física de Cantabria



INSCRIPCIONES ABIERTAS

TODA LA INFORMACIÓN EN WWW.IFCA.UNICAN.ES



Cartel del concurso de cómics IFCA dedicado a astrónomas.

HABLA CON ELLAS: MUJERES EN ASTRONOMÍA

Las llamadas áreas STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) continúan siendo percibidas por la sociedad como “profesiones masculinas” y la presencia de mujeres sigue siendo baja en muchas de ellas. En 2017, tras organizar varias actividades para el público local con motivo de la celebración del Día Internacional de las Mujeres y las Niñas en la Ciencia, un grupo de investigadoras, ingenieras y divulgadoras del Instituto de Astrofísica de Canarias comenzamos a reunirnos para idear otras acciones que nos permitieran contribuir a cambiar los estereotipos de género en estos ámbitos, visibilizar el trabajo de las mujeres en ellos y ofrecer a las estudiantes nuevos referentes profesionales. Nació así “Habla con Ellas: Mujeres en Astronomía”.

Nayra Rodríguez Eugenio

Instituto de Astrofísica de Canarias
nre@iac.es

Icía Montilla

Instituto de Astrofísica de Canarias
imontilla@iac.es

Gloria Andreuzzi

Fundación Galileo Galilei - INAF
andreuzzi@tng.iac.es

Anna Ferre-Mateu

Instituto de Astrofísica de Canarias
aferremateu@gmail.com

En nombre de todas las colaboradoras de
Habla con Ellas: Mujeres en Astronomía

El informe “Radiografía de la brecha de género en la formación STEAM” [1], realizado en 2022 por la Unidad de Igualdad del Ministerio de Educación y Formación Profesional del Gobierno de España, muestra que estamos perdiendo talento femenino en algunas disciplinas clave para el futuro y, en particular, aquellas directamente relacionadas con la Astronomía. Por poner algunos números, el porcentaje de alumnas matriculadas en el grado de Física en universidades públicas españolas pasó del 36% en el curso 2002-2003 al 26,7% en 2019-2020. Se observa un descenso similar en Matemáticas (del 45,5% al 36,3%) entre los mismos cursos escolares y aún mayor en Ingeniería Informática (del 31,2% al 12,7%).

Para conseguir que más niñas y jóvenes se interesen por estas disciplinas, hay que desmontar el estereotipo del profesional STEM como un hombre, raro, friki y extremadamente inteligente, idea muy extendida, sobre todo tras el éxito de la serie de televisión *The Big Bang Theory*. Esta representación contribuye a que las áreas STEM sean percibidas como poco atractivas para una gran parte del alumnado preuniversitario de ambos sexos y puede tener un mayor efecto desalentador en las chicas.

“Habla con Ellas: Mujeres en Astronomía” es una iniciativa de un grupo de profesionales del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), apoyada y coordinada por su Unidad de Comunicación y Cultura Científica, que busca cambiar los estereotipos de género en Ciencia y Tecnología y fomentar el interés del alumnado por estas áreas, especialmente entre las niñas y jóvenes.

Consiste en la realización de videoconferencias con centros educativos, principalmente de España, en las que las ponentes (astrónomas, astrofísicas, ingenieras y gestoras de proyectos) explicamos nuestro trabajo, hablamos de nuestro campo de investigación y contestamos a las preguntas del alumnado sobre la carrera científico-tecnológica, el Universo o los métodos que empleamos para estudiarlo.

El proyecto se puso en marcha en 2019 como una de las actividades de divulgación apoyadas por el Programa Severo Ochoa del IAC y, en la actualidad, estamos desarrollando su quinta edición consecutiva.



Imágenes de algunas de las actividades de “Habla con Ellas: Mujeres en Astronomía”.

DEL DISEÑO A LA PUESTA EN MARCHA

Durante las reuniones de definición del proyecto, debatimos estudios sobre la aparición y el desarrollo de las ideas culturales relacionadas con la capacidad intelectual y su impacto en los intereses de niños y niñas, compartimos lecciones aprendidas de nuestras experiencias previas en divulgación y analizamos otras iniciativas, como la campaña "Redraw the balance".

Este análisis nos sirvió para identificar a nuestro público objetivo. Los estereotipos de género se definen en la infancia, entre los 5 y 7 años [2], y sus efectos se acentúan significativamente con la edad, especialmente en las niñas [3]. Por lo tanto, decidimos centrarnos en la comunidad educativa, desde Infantil a Bachillerato y Formación Profesional.

Elegimos el formato de videoconferencia por dos razones: por un lado, para ofrecer una visión cercana y actual de las mujeres que trabajamos en Astronomía y, por otro, para llegar de forma rápida, sostenible y con muy bajo coste a escuelas alejadas de nuestras sedes y, en especial, a aquellas que no cuentan con un centro de investigación cerca. Se consigue también un mayor alcance con menos inversión de tiempo que en las charlas presenciales, ya que se eli-

minan los desplazamientos y, en muchas ocasiones, la videoconferencia se realiza con varios grupos a la vez. Este formato nos permitió, además, continuar con las actividades durante el confinamiento decretado en 2020 para combatir la pandemia de COVID-19.

Cada año, la coordinadora del programa hace una llamada a la participación entre el personal del IAC y las instituciones presentes en los Observatorios de Canarias. Se configura el equipo de ponentes colaboradoras de esa edición y se comparte con ellas información relativa a la gestión de las solicitudes, la realización de las videoconferencias, así como algunos consejos y buenas prácticas a tener en cuenta en actividades con público escolar y, también, recursos que les pueden servir en la preparación de las mismas.

El programa cuenta con una [página web](#) que incluye un formulario de solicitud de videoconferencias para los centros educativos, así como con fichas biográficas divulgativas sobre las ponentes y una galería de imágenes con los carteles anunciadores de las distintas ediciones y fotos de algunas de las actividades realizadas.

El profesorado solicita las videoconferencias rellenando el formulario en el que propone fechas, horas, temática

e idioma preferidos, y se encarga de organizar la actividad en su centro. Las ponentes acceden directamente al listado de solicitudes en la web del IAC, seleccionan aquellas que se adaptan a su perfil y disponibilidad, y acuerdan con los docentes la fecha y hora definitivas, así como el programa que se utilizará para la videoconferencia. En ocasiones, cuando el centro educativo se encuentra cerca del lugar donde la ponente vive o trabaja, se acuerda hacer la actividad de forma presencial.

El proyecto y sus actividades se difunden a través de notas de prensa y de las redes sociales del IAC con los *hashtags* #HablaConEllas #MujeresEnAstronomía. En muchos casos, los propios centros educativos las difunden también en sus redes y blogs, ayudando al cambio de los estereotipos de género también entre las familias del alumnado y el público general.

ALGUNOS RESULTADOS

En las cinco ediciones desarrolladas hasta el momento, 2019-2023, han participado un total de 52 colaboradoras del IAC y de otras 12 instituciones, que han realizado 210 actividades, con un alcance de más de 8.000 estudiantes de Educación Infantil, Primaria, Secundaria, Formación Profesional y Formación de Personas Adultas de toda España.

Una parte importante del programa es la evaluación de su impacto y eficacia. Tras la realización de las videoconferencias, se pasan encuestas de valoración al profesorado participante y al alumnado de Educación Secundaria Obligatoria en adelante. Los resultados de estas encuestas muestran valoraciones muy positivas de las actividades y un alto grado de consecución de los objetivos perseguidos. El 66% del alumnado encuestado indicó que la actividad ha significado un cambio en su percepción de las profesiones STEM y el 71% refirió un aumento de su interés por estas áreas.

El programa es también evaluado desde el punto de vista de las colaboradoras, a través de reuniones de debate y puesta en común de experiencias al final de cada edición, lo que nos ha permitido identificar las lecciones aprendidas y proponer mejoras que hemos ido implementando en las ediciones siguientes.

Queremos aprovechar estas últimas líneas para compartir algunas de nuestras impresiones y reflexiones sobre el proyecto:

“Me impresionó ver lo emocionante e inspirador que era para las niñas y niños verme y hablar conmigo”. Nataly Ospina, investigadora postdoctoral de la Universidad Autónoma de Madrid.

“Estoy particularmente sorprendida por el interés que tienen muchos docentes en transmitir a las alumnas de sus institutos la importancia de la presencia de mujeres en el mundo de la ciencia y el hecho de que ellas tienen las mismas posibilidades que los chicos para alcanzar sus objetivos”. Gloria Andreuzzi, astrónoma del Telescopio Nazionale Galileo.

“Es muy gratificante escuchar al alumnado decir que después de tu charla quieren dedicarse a la astronomía o a cualquier otra disciplina STEM”. Anna Ferré-Mateu, investigadora postdoctoral del IAC.

“Me sorprendió que al alumnado, tanto chicas como chicos, les interese saber si me he encontrado con más dificultades en mi carrera profesional o en mis estudios por ser mujer, lo que implica que ya están preocupados por temas de igualdad”. Alicia López Oramas, investigadora postdoctoral del IAC.

“Me uní a esta iniciativa desde sus inicios, pero este año he tenido una experiencia reveladora con un colegio que se encuentra en uno de los barrios más deprimidos de Santa Cruz (Tenerife). Es un cole pequeño, con pocos medios, con gran parte del alumnado proveniente de entornos desestructurados, pero se involucraron totalmente en la actividad. Me di cuenta de que son niños y niñas que necesitan saber que tienen un futuro. Después de las charlas, cuatro niñas me dijeron que querían dedicarse a mi profesión y que mi experiencia, trabajar en algo que te guste, les motivaba mucho para seguir estudiando (porque, sí, les dejé claro que es necesario estudiar mucho). Este año, en particular, sacar tiempo para actividades de divulgación me ha resultado complicado, pero me ha quedado clarísimo que el esfuerzo vale la pena. Esta iniciativa puede cambiar vidas y dar a muchas niñas (y niños) una perspectiva de futuro que no tienen”. Lcía Montilla, ingeniera óptica del IAC.

AGRADECIMIENTOS

Esta iniciativa es posible gracias a la dedicación de muchas colaboradoras comprometidas con la igualdad de género en Ciencia y Tecnología. Su éxito se



Cartel anunciador de la edición 2023 de “Habla con Ellas: Mujeres en Astronomía”, con el equipo de ponentes colaboradoras.

debe, en gran medida, a su esfuerzo para dar respuesta a todas las solicitudes recibidas, adaptándose en lo posible a las necesidades de los centros educativos, y también para lograr que la comunicación sea clara, cercana y amena.

REFERENCIAS

- [1] “Radiografía de la brecha de género en la formación STEAM: un estudio en detalle de la trayectoria educativa de niñas y mujeres en España”, 2022. Unidad de Igualdad del Ministerio de Educación y Formación Profesional del Gobierno de España. ISBN 978-84-369-6050-1.
- [2] Bian L, Leslie SJ, Cimpian A. “Gender stereotypes about intellectual ability emerge early and influence children’s interests”. *Science*. 2017, 355(6323), 389-391.
- [3] Miller, D.I., et al. 2018, “The Development of Children’s Gender-Science Stereotypes: A Meta-analysis of 5 Decades of U.S. Draw-A-Scientist Studies”, *Child Development*, 89, 6.

Mapa con las localizaciones de los centros educativos que han participado en el programa entre 2019 y 2023.



EL CONSEJO DE MINISTROS APRUEBA LA ADHESIÓN DE ESPAÑA AL OBSERVATORIO DEL SKA

El pasado 4 de abril alcanzamos un hito en el proyecto conjunto emprendido por la comunidad española para participar en el radiotelescopio SKA (*Square Kilometre Array*). Ese día el Consejo de Ministros aprobó la adhesión de España al [Observatorio del SKA](#) (SKAO de sus siglas en inglés), la organización intergubernamental encargada de la construcción y futuras operaciones de dos radiointerferómetros que abrirán una nueva era en el conocimiento del universo y la física fundamental.

Esta andadura, que comenzó en la década de los 90, cristalizó con la entrada de España en 2018 como undécimo país miembro de la *SKA Organisation*, entidad encargada del diseño. En 2021 esta organización evolucionó al actual SKAO, lo que supuso un cambio de régimen jurídico que conlleva la firma de un acuerdo intergubernamental e implica nuevos procesos a nivel nacional. Ese mismo año el Consejo de SKAO aprobó la membresía de España y ahora, con la aprobación del Consejo de Ministros y el compromiso de contribuir con 41.5M€ en los primeros 10 años del Observatorio, ya somos país miembro. Gracias a esto, la explotación científica del instrumento por parte de nuestra comunidad, y la asignación de contratos de construcción, está asegurada. El proceso de adhesión se completará tras la confirmación por las Cortes Generales.

La participación en SKAO supone una oportunidad única para la astrofísica en España. Por sus dimensiones y amplio rango en longitudes de onda (SKA-Mid: 197 platos, 450MHz-14GHz; SKA-Low: más de 131000 antenas, 50-350MHz), su sensibilidad, resolución angular sin precedentes y gran velocidad de muestreo, SKA permitirá descubrimientos en la frontera del conocimiento en áreas en las que nuestra comunidad juega un papel activo, desde la formación de estrellas y planetas hasta la formación y evolución de las galaxias, o el estudio de agujeros negros y pulsares como trazadores de gravedad extrema. Además, SKAO espera tener impacto en la sociedad por su compromiso con la sostenibilidad y la Ciencia Abierta.

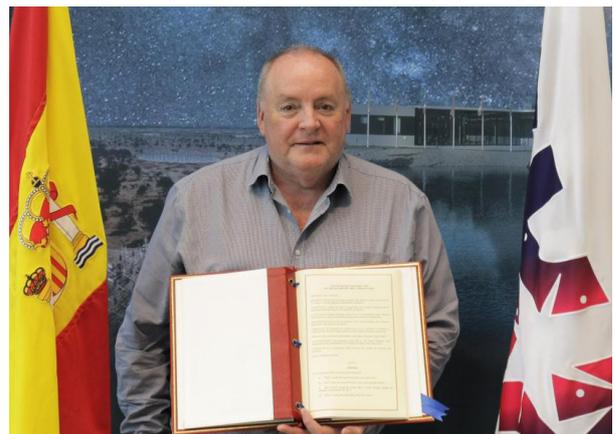
La participación en los Grupos Científicos de SKA ha aumentado significativamente en los últimos años, llegando actualmente a 60 investigadores de 18 instituciones españolas. Nuestra comunidad ya ha emprendido un trabajo preparatorio mediante el uso de los telescopios precursores del SKA (MeerKAT, HERA, MWA y ASKAP), clave para participar en los Key Science Projects, que cubrirán el 50-75% del tiempo en los primeros 5 años de operaciones.

Asimismo, los SKA Data Challenges están contribuyendo a preparar a la comunidad para analizar los datos de SKA, y para llevarlo a cabo en su red internacional de centros regionales (SRCs). Estos constituirán el núcleo científico del SKAO, proporcionando a los equipos internacionales acceso a los datos, herramientas de análisis, y capacidad de computación necesarios para su explotación. El Prototipo de SRC español (SPSRC), desarrollado en el [Instituto de Astrofísica de Andalucía \(IAA-CSIC\)](#) se ha convertido en pieza clave en el prototipado de la red de SRCs. Entre otros, el SPSRC es referente en Ciencia Abierta dentro de la comunidad SKA. En la edición anterior de los SKA Data Challenges obtuvo la Insignia de Oro a la reproducibilidad un equipo español que utilizó para ello el SPSRC.

Desde la noticia publicada en 2021 en este boletín sobre la participación de España en la constitución del SKAO, hemos contribuido, entre otros, a organizar el pasado 2022 sesiones específicas en las reuniones de la EAS y la SEA, o la primera escuela de Ciencia Abierta del SKA (co-organizada el pasado mayo por el programa Severo Ochoa del IAA-CSIC y el SKAO). En colaboración con CDTI trabajamos para maximizar el retorno de la inversión española en el SKA. De los 500M€ ya adjudicados por SKAO en contratos de construcción, el primer contrato adjudicado a España ha sido para la empresa Safran, para el desarrollo del sistema de distribución de la señal de tiempo para ambos telescopios de SKAO. Este año ha sido también aprobada la Red temática de SKA con participación de grupos de 15 centros, liderada desde el IAA-CSIC.

Con la esperada puesta en marcha el año que viene de sus primeras antenas, la era de SKA está iniciándose y desde la Oficina de coordinación de la participación española en SKA os animamos a uniros a uno de los proyectos científicos más ambiciosos de este siglo.

Philip Diamond, dir. gral. del SKAO, sostiene el Convenio del Observatorio entre las banderas del SKAO y España. Crédito SKAO



GALÁCTICA SE ABRE AL MUNDO

Tras más de diez años de trabajo para convertirse en una realidad, Galáctica ha abierto sus puertas esta primavera. Galáctica es el Centro de Difusión y Práctica de la Astronomía gestado por el Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA). Ubicado a las faldas del Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ), en Arcos de las Salinas, Teruel, aspira a convertirse en un centro de referencia en el que descubrir y practicar la astronomía.

El origen de Galáctica se encuentra en los propios inicios del CEFCA. En el momento de su constitución, en paralelo a la construcción del OAJ, se estableció como parte de las actividades fundamentales del centro de investigación la creación de un espacio de divulgación de la astronomía para toda la sociedad.

Partiendo de esta base, el proyecto se diseñó de tal forma que pudiese abordar el acercamiento y la práctica de la astronomía desde múltiples ángulos, y con el firme propósito de poner en valor nuestra ciencia y promover las vocaciones científicas.

El afán del CEFCA ha sido poder crear un centro en el que poder aproximarse a la astronomía sea cual sea el interés de las personas, tratando de satisfacer la demanda que tiene la sociedad de conocer y aprender. De conocer y aprender, con intereses tan distintos como pueden ser aprender un poco sobre el Universo, saber qué se puede ver en el cielo, cómo manejar un telescopio o poder observar el Sol; y en el que tuviesen cabida tanto el público general, como los niños y jóvenes, los aficionados a la astronomía, las universidades y el propio mundo de la investigación.

Pero en Galáctica hemos querido poner especial énfasis en que las personas puedan descubrir cómo es nuestra profesión, cómo se trabaja en astrofísica, entender los grandes desarrollos tecnológicos que son necesarios para realizar nuevos proyectos e investigaciones y todo lo que hay detrás para poder llegar a realizar un nuevo descubrimiento y avanzar en el conocimiento.

Todo ello nos ha llevado a materializar Galáctica en un centro moderno con un amplio despliegue tecnológico, que cuenta con infraestructuras y telescopios semiprofesionales para la observación del cielo. Así, el centro dispone de nueve cúpulas y una sala de control, que ofrece la oportunidad al visitante de observar y practicar astronomía con los telescopios del centro, entre ellos un telescopio de 80 cm de apertura. Pero además ofrece la posibilidad de instalar

telescopios propios en las cúpulas destinadas para este fin, estando todas las infraestructuras preparadas para observar tanto de forma presencial como en remoto. Y, también, cuenta con aulas, una sala de conferencias y un anfiteatro que proporcionan versatilidad a la práctica astronómica.

La infraestructura observacional se complementa con un gran espacio museográfico interactivo, adaptado a distintos niveles de conocimiento para público infantil y adulto, con amplios contenidos sobre el cielo y el Universo, pero que también ponen el foco en dar a conocer la astrofísica de hoy y buscan divulgar el gran desarrollo que tiene la astronomía en nuestro país.

En su realización, junto al CEFCA, han participado los miembros de la SEA Javier Gorgas, como asesor científico en las fases de definición y de ejecución de los contenidos, y Juan Ángel Vaquerizo en la fase de ejecución. Además, compañeros de profesión han puesto su voz para contar en primera persona en qué consiste el trabajo en ingeniería, la operación nocturna, la investigación, el papel de las universidades... sin olvidar la contribución de la astronomía amateur, para lo cual han participado también miembros de la FAAE, y el de la ciencia ciudadana. También, para la dotación de los contenidos, han colaborado varios centros de investigación, observatorios y astrónomos.

Galáctica es pues un proyecto que nace con la participación de toda la comunidad, en el que poder descubrir las distintas piezas del puzle que conforma hoy el mundo de la astronomía. Ya inaugurado y con la puesta en marcha de todas sus infraestructuras, este proyecto se abre ahora al mundo y comienza su andadura al servicio de nuestra sociedad.

Instalaciones de Galáctica. Al fondo, Arcos de las Salinas.



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.

ARIADNA CALCINES, PREMIO AL JOVEN TALENTO CIENTÍFICO FEMENINO

Nuestra colega Ariadna Calcines Rosario, investigadora en la Universidad de Durham (Reino Unido), ha recibido el Premio al Joven Talento Científico Femenino en la categoría de "Ciencias aplicadas a la tecnología" por el desarrollo de la tecnología de image slicer para física solar. ¡Enhorabuena, Ariadna!

ANA ULLA, VIGUESA DISTINGUIDA

La Coordinadora Nacional de Divulgación de la IAU en España y primera catedrática de astrofísica de la Universidad de Vigo, Ana Ulla, ha sido nombrada "Viguesa distinguida 2023". ¡Muchas felicidades, Ana!

¡MIEMBROS DE PLENO DERECHO DE SKAO!

El Consejo de Ministros ha aprobado la adhesión de España como miembro de pleno derecho al Observatorio SKA (SKAO). ¡Una gran noticia para toda nuestra comunidad!

RENOVACIÓN DEL CONSEJO ASESOR DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN

Este órgano dependiente del Ministerio de Ciencia e Innovación procedió en abril a la renovación de sus 13 miembros, incorporando entre ellos a Vicent Martínez (UV). Con su selección, nuestra comunidad astronómica tendrá un representante en este comité. ¡Enhorabuena, Vicent!

ENRIC PALLÉ, NUEVO GESTOR DE AYA

Siguiendo con los nombramientos, el profesor Enric Pallé (IAC) se ha incorporado al equipo formado por Patricia Sánchez y Miguel Ángel Aloy para llevar las riendas del Plan nacional de Astronomía y Astrofísica. ¡Felicidades, Enric y a todo el equipo por la labor que realizáis!

RAFAEL BACHILLER, PREMIO CSIC-FBBVA 2023

Nuestro colega Rafael Bachiller ha recibido un nuevo premio por su ingente labor de comunicador científico. Esta vez ha sido galardonado con el premio a la comunicación científica CSIC-FBBVA 2023 en la categoría de divulgación y comunicación de la ciencia por "una larga trayectoria de dedicación sostenida a la difusión del conocimiento". ¡Muchas felicidades, Rafael!

DOS SISTEMAS PLANETARIOS RECIBEN NOMBRES ESPAÑOLES

En una nueva edición del certamen "Nombrar Exomundos" la IAU ha aceptado nombrar dos sistemas planetarios con designaciones de las culturas vasca y balear. Desde ahora, GJ 486 y GJ 486b pasan a llamarse también "Gar" y "Su", mientras que WASP-166 y WASP-166b serán 'Filetdor' y 'Catalineta'. ¡Enhorabuena a los dos equipos proponentes, entre los que había varios socios de la SEA!

Amelia Ortiz Gil

AstronautA

Pioneras de la exploración espacial

Prólogo de Pedro Duque

ASTRONAUTA PIONERAS DE LA EXPLORACIÓN ESPACIAL

Amelia Ortiz Gil

ISBN: 978-84-7822-903-1

Editorial Institució Alfons el Magnànim –
Centre Valencià d'Estudis i d'Investigació

La misión Artemis III, actualmente planificada para 2025, volverá a llevar humanos a la superficie de la Luna. El compromiso de la NASA es que entre los miembros de la tripulación haya mujeres y personas de color. Esta vuelta a la Luna será, por tanto, muy diferente de los paseos lunares de los astronautas de las misiones Apollo del siglo pasado en las que solo tuvieron el honor de explorar nuestro satélite hombres y blancos.

Ahora todo será diferente, empezando por el nombre de la misión. Artemis es la hermana melliza de Apollo, diosa de la caza, los animales salvajes, el terreno virgen, los nacimientos, la virginidad y las doncellas, que aliviaba las enfermedades de las mujeres.

La pretensión de la agencia espacial de crear una tripulación diversa y paritaria no ha sido fruto de su buena voluntad sino de la presión constante de la sociedad, pero sobre todo del camino emprendido por el pequeño y decidido grupo de mujeres que desde los inicios de la era espacial han estado luchando por tener un lugar en la exploración del espacio, al mismo nivel que sus compañeros hombres.

Este reconocimiento tardío del papel esencial de las mujeres en la creación de las nuevas plantillas de astronautas no solo tiene el objetivo de reparar una injusticia, sino también de fomentar la creatividad y aprovechar el talento en la población general, aumentando de manera significativa las probabilidades de éxito de las misiones en el espacio.

Pero en un principio no fue así. Las pioneras americanas del Mercury 13, que hubieran podido llegar al espacio junto a los hombres del programa Mercury, fueron salvajemente vetadas de cualquier misión. No eran necesarias, según dijo la NASA.

AstronautA, Pioneras de la exploración espacial, de Amelia Ortiz, es un libro necesario para explicar esa aberración histórica, las luchas por la igualdad de estas y de otras pioneras de la exploración espacial.

El libro relata las esperanzas y los anhelos de las pioneras que, con perseverancia y tozudez, se negaron a aceptar que el *orden social establecido* las dejara fuera de la exploración espacial, tal como John Glenn declaró en 1962 ante la comisión de investigación del Congreso de los Estados Unidos que estudiaba la posible discriminación de la NASA contra las mujeres del Mercury 13.

La carrera espacial fue, sobre todo, parte de la propaganda ideológica de los dos bloques durante la guerra fría. La autora nos habla de la primera mujer que fue al espacio, Valentina Tereshkova,



heroína de la Unión Soviética, que formaba parte del primer grupo de mujeres cosmonautas, al que el cosmonauta Leónov llamó jocosamente “el escuadrón de las enaguas”. La primera y única hasta que en los años 80 Svetlana Savítskaya se convirtió en la segunda mujer en el espacio, recibida con un delantal por sus compañeros cosmonautas en la estación espacial Salyut 7.

No fue hasta 1983, cuando Sally Ride, de la mano de la NASA, se convirtió en la tercera mujer en llegar al espacio y la primera norteamericana. Después de ella, muchas más formaron parte de las tripulaciones de los transbordadores espaciales, aunque solo como astronautas especialistas de misión.

Luego fueron cayendo los records, los límites mentales invisibles que la sociedad nos marca. Mae Jemison, la primera astronauta de color; Ellen Ochoa, la primera hispana; Eileen Collins, la primera piloto. Luego vinieron las europeas, entre las que encontraremos a Samantha Cristoforetti y las chinas como Liu Yang.

El ejemplo de todas ellas, a pesar de las vejaciones y decepciones, pero sobre todo por sus éxitos clamorosos, es la demostración que una mujer es capaz de hacer su trabajo en el espacio tan bien como un hombre, y este hecho ha espoleado a otras a seguir su camino.

La exploración del espacio es una tarea que incumbe a toda la humanidad. Es necesario que todos los que estén dispuestos y capacitados, tanto mujeres como hombres, asuman el riesgo de viajar a la Luna, a Marte o dónde nuestra curiosidad como especie nos lleve en los próximos decenios.

Enric Marco
Departament d'Astronomia i Astrofísica
Universitat de València

Abundancias químicas de elementos de captura neutrónica en la Vía Láctea

Autor: Carlos Viscasillas Vázquez

Tesis doctoral dirigida por:

Gražina Tautvaišienė

Centro: Instituto de Física Teórica y Astronomía. Universidad de Vilnius

Fecha de lectura: 14 de septiembre de 2022

Derecha: Representaciones 3D de $[Ba/Al]$ en función de la edad y la distancia galactocéntrica para 62 cúmulos abiertos en tres regiones galactocéntricas (interna, solar, externa) y toda la muestra vistas desde tres perspectivas diferentes.

La comprensión de la formación, estructura y evolución de la Vía Láctea es uno de los principales interrogantes en la astronomía moderna. La Galaxia está compuesta de elementos químicos que van desde los originados en el Big Bang hasta los formados por nucleosíntesis estelar. Entre ellos, hay algunos que destacan por su especial nucleosíntesis, son los llamados elementos de captura neutrónica, y que en algunos casos son producidos en eventos astronómicos extremos, como colisiones entre estrellas de neutrones o supernovas. A pesar de que los elementos de captura neutrónica representan la mayoría de los elementos en la tabla periódica, solo constituyen una pequeña cantidad de la composición global del Universo. Sin embargo, es en este pequeño porcentaje donde se encuentran las claves para comprender la evolución química de la Galaxia.

La tesis comienza introduciendo las abundancias de elementos de captura neutrónica en su contexto astrofísico. Se clasifican estos elementos según diferentes criterios y se presentan los procesos de nucleosíntesis que los generan, dividiéndolos en lentos (-s) y rápidos (-r). Se revisan sus abundancias en el Sistema Solar y se presentan los posibles lugares astrofísicos donde se producen.

Se presenta después la metodología utilizada en la tesis aplicada a dos muestras, una de estrellas de campo y otra de cúmulos abiertos. La primera consiste en 506 estrellas en el vecindario solar observadas desde el Observatorio Astronómico de Molėtai (Lituania) utilizando el espectrógrafo VUES. Se proporciona información sobre la adquisición de datos, parámetros atmosféricos, análisis de abundancias, edades y órbitas. La segunda consta de 62 cúmulos abiertos del Gaia-ESO Survey idr6, observados con el espectrógrafo UVES instalado en el VLT en Paranal (Chile). Se proporcionan detalles sobre el análisis de espectros y selección de miembros.

La tesis continúa con el análisis de las abundancias químicas, abordando primero las relaciones $[E/Fe]$ en función de la metalicidad para diez elementos de captura neutrónica, según su clasificación: primer pico -s, segundo pico -s, elementos mixtos y elementos dominados por -r. Después se examina la relación $[hs/ls]$ (los llamados indicadores del proceso -s) para controlar la eficiencia del proceso y la confiabilidad de los modelos GCE, encontrando un comportamiento diferenciado para las dos componentes del disco galáctico. Termina esta parte con un estudio de las relaciones $[r/\alpha]$ versus $[Fe/H]$. Los resultados sugieren aquí que el proceso -r fue el único proceso de captura neutrónica activo al comienzo de la formación del disco grueso, y que existe una evolución química diferente en ambos componentes galácticos. También se proponen mejoras en los modelos teóricos.

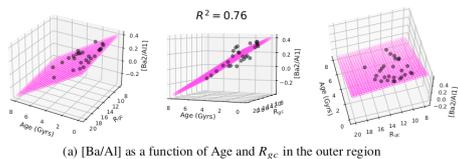
Más tarde se abordan los gradientes de abundancia de elementos de captura neutrónica en el disco galáctico. La distribución de las abundancias químicas en la Galaxia no es uniforme en edad y posición, lo que resulta en gradientes de abundancia. Los elementos de captura neutrónica son claves, porque su producción es "específica del sitio". Por ello, tanto los mecanismos de formación del disco como la nucleosíntesis estelar dejan su marca en estos gradientes. Dividimos el estudio en gradientes temporales y gradientes espaciales. Se comparan los gradientes en los discos delgado y grueso. Las conclusiones principales son que los gradientes de abundancia de los elementos de captura neutrónica en el disco galáctico varían según la edad y la ubicación espacial. En el disco delgado, los gradientes de edad son negativos para el Sr, Y y Ba y se vuelven positivos para los elementos dominados por el proceso-r. Además, los gradientes radiales de abundancia en el disco delgado son insignificantes para los elementos dominados por el proceso-s y se vuelven positivos para los elementos dominados por el proceso-r.

A continuación examinamos el uso de las abundancias de elementos de captura neutrónica como relojes químicos. Aplicamos las relaciones $[s/\alpha]$ a nuestras muestras, por separado para los discos delgado y grueso y OCs. Utilizamos regresiones multivariantes ponderadas en función de la edad, metalicidad y R_{gc} (figura) para describir las relaciones entre la edad de los OCs y sus características químicas. Investigamos las variaciones radiales de las relaciones $[s/\alpha]$ y el papel de la migración, comparando nuestros resultados con los de la literatura disponible. Más tarde explicamos las relaciones de abundancia $[Y/H]$ e $[Y/Mg]$ de cúmulos estelares en el disco interior de la Galaxia desde un punto de vista teórico con una nueva prescripción basada en la mezcla magnética en estrellas AGB, que causa una producción menos eficiente de Y a alta metalicidad. Concluimos que las diferencias en R_{mean} pueden producir variaciones en el y-intercepto para la relación $[Y/Mg]$ -edad. Encontramos una correlación casi despreciable de $[Y/Mg]$ con la edad en el disco grueso, reservando la propiedad de indicadores de edad para las estrellas en el disco delgado. En cuanto a los OCs, concluimos que no hay una relación de reloj químico de edad válida para todo el disco, sino que hay una fuerte dependencia con la posición galactocéntrica. Las relaciones que involucran Ba son las más sensibles a la edad.

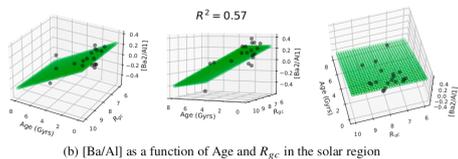
Para finalizar, proporcionamos una visión general de la tesis, enumerando las conclusiones, las limitaciones y las perspectivas futuras.

Tesis disponible en:

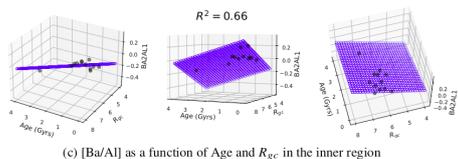
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022PhDT.....2V/abstract>



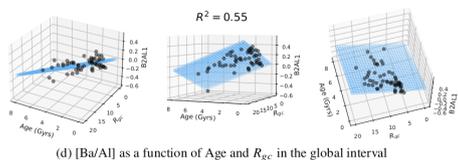
(a) [Ba/Al] as a function of Age and R_{gc} in the outer region



(b) [Ba/Al] as a function of Age and R_{gc} in the solar region



(c) [Ba/Al] as a function of Age and R_{gc} in the inner region



(d) [Ba/Al] as a function of Age and R_{gc} in the global interval

Sistemas estelares binarios de rayos X de alta masa vistos a través de XMM-Newton: vientos, flujos y acreción en 4U0114+65, Cen X-3 y XTE J1855-026

Autora: Graciela Sanjurjo Ferrín
(graciela.sanjurjo@ua.es)

Tesis doctoral dirigida por: José Miguel Torrejón Vázquez

Centro: Universidad de Alicante

Fecha de lectura: 30 de noviembre de 2022

Los sistemas estelares binarios de rayos X de alta masa se componen de un objeto compacto, que puede ser una estrella de neutrones, un agujero negro o una enana blanca, y de una estrella gigante, generalmente de tipo B o tipo O, llamada la compañera.

La producción de rayos X ocurre cuando el objeto compacto (que orbita suficientemente cerca de la compañera y, por lo tanto, está totalmente sumergido en el viento estelar) capta gravitatoriamente materia de la compañera y esta cae sobre el objeto compacto, convirtiendo en la energía potencial en energía radiactiva en forma de rayos X. Esta acreción puede ocurrir por captación del viento estelar o por formación de un disco alrededor del objeto compacto.

Con el análisis espectral podemos deducir propiedades generales del sistema, como la luminosidad, temperatura o campo magnético. Además, estos rayos X, a su vez, iluminan el viento estelar y este produce líneas de emisión, cuyas propiedades

(como la anchura e intensidad) nos dan una valiosísima información sobre las propiedades del viento y del sistema.

Por otro lado, el análisis temporal, como la evolución del *spin* del objeto compacto a lo largo de los años o la forma del pulso, también es una herramienta útil para tratar de descifrar la naturaleza de estos sistemas tan complejos.

Una característica de la astronomía de rayos X es que estos son absorbidos por la atmósfera, y, por lo tanto, es necesario realizar las observaciones desde telescopios en órbita. Esta tesis doctoral se fundamenta en el análisis de datos del observatorio XMM-Newton, que fue puesto en órbita por la ESA el 10 de diciembre de 1999, y se compone de tres telescopios de rayos X y de un monitor óptico. Hasta la fecha, es el mayor satélite científico construido en Europa.

La astronomía de rayos X, y consecuentemente el estudio en rayos X de sistemas binarios de alta masa, es un campo de estudio muy reciente en el que queda mucho por hacer.

En esta tesis doctoral estudiamos a fondo observaciones de tres sistemas binarios de alta masa de rayos X:

La fuente 4U0114+65 es uno de los púlsares más lentos conocidos hasta el momento. Está formado por una donante de alta masa de tipo espectral B1a y una NS que la orbita con un período de 11,6 d. La NS gira sobre su eje con un período de ~ 9350 s. Esta fuente podría ser un magnetar (NS con un campo magnético muy intenso, incluso para una NS). En este trabajo presentamos el análisis de una observación en período propietario realizada con el satélite XMM-Newton durante 49 ks, donde hemos estudiado el proceso de acreción, las propiedades del viento estelar, la naturaleza de los pulsos de rayos X y motivamos que su campo magnético esté en el rango del de un magnetar.

Cen X-3 es un sistema binario compacto de rayos X de alta masa. La acreción sobre el objeto compacto, una NS en este caso, tiene lugar mediante disco de acreción. En este trabajo hemos analizado dos observaciones llevadas a cabo con el telescopio XMM-Newton. Una de ellas tuvo lugar en el año 2001, durante las fases orbitales $ph = 0,0 - 0,37$. Esta observación fue tomada durante la salida del eclipse del objeto compacto, cuando la fuente se encontraba en un estado superorbital *hard-low*; *hard* porque la emisión de rayos X es muy energética y *low* porque la intensidad es baja. La segunda observación tuvo lugar en el año 2006, durante las fases orbitales $ph = 0,35 - 0,8$. En este caso la fuente se encontraba en un estado superorbital *soft-high*, es decir, la luz emitida no es tan energética como en la primera observación pero su intensidad es mayor. Por último, presentamos un análisis de la primera observación tomada con el observatorio XMM-Newton del sistema eclipsante HMXRB XTE J1855-026. La observación tuvo lugar totalmente durante el eclipse de la NS, cubriendo las fases orbitales $ph = 0,00 - 0,11$. Hemos comparado nuestro análisis de la fuente en eclipse con uno previo realizado con Suzaku en las fases orbitales previas al eclipse y hemos estudiado el viento estelar retroiluminado de la donante tipo B0I.

Gracias a estos análisis hemos podido calcular el *spin-up* de la fuente 4U 0114+65 y motivar su naturaleza como magnetar. Hemos observado estructuras emerger del eclipse en Cen X3 y analizado la complejidad de la interacción del campo magnético de la estrella de neutrones con la parte interior del disco de acreción, además de proponer posibles localizaciones de generación de la línea de hierro casi neutro. En XTE J1855-026 hemos observado plasma con dos grados de ionización diferentes procedentes de diferentes fases del viento estelar, hemos comparado nuestra observación con una producida antes del eclipse del objeto compacto y hemos investigado la naturaleza de los eclipses profundo en binarias de alta masa con compañeras de tipo I y II.

Tesis disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/133881>

Desde la Era de la Precisión hacia la Era de la Exactitud de la cosmología con DESI

Autor: Samuel Brieden

(samuel.brieden@ed.ac.uk)

Tesis doctoral dirigida por: Héctor Gil-Marín y Licia Verde

Centro: Universitat de Barcelona

Fecha de lectura: 14 de septiembre de 2022

A pesar de los recientes éxitos de la Cosmología al haber entrado en la "Era de la Precisión", todavía hay cuestiones abiertas. Los principales ingredientes del modelo estándar Λ CDM, la energía oscura (parametrizada a través de la constante cosmológica de Einstein, Λ) y la materia oscura fría (CDM) contribuyen al $\sim 95\%$ de la densidad de energía total del Universo. Pero su naturaleza subyacente sigue siendo completamente desconocida. Además, diferentes observaciones cosmológicas favorecen diferentes valores de los parámetros, con la discrepancia más famosa siendo la "tensión" de hasta 5σ entre las mediciones en tiempo temprano dependientes del modelo y sus mediciones directas en tiempo tardío de la constante de Hubble H_0 .

El cartografiado del Instrumento Espectroscópico de Energía Oscura (DESI) se puso en marcha para desentrañar el misterio de la energía oscura midiendo millones de espectros de galaxias y cuásares distantes para crear el mayor mapa tridimensional de la estructura a gran escala del Universo jamás obtenido. La historia de la expansión se obtiene mediante la técnica denominada regla estándar: las distancias (en función del corrimiento al rojo) se miden en unidades de una escala característica, la regla estándar, que es una huella de las ondas de gravedad-presión en el Universo primitivo que da lugar a las llamadas oscilaciones acústicas de bariones (BAO). La tasa de crecimiento de las estructuras se obtiene mediante la medición de la anisotropía de la agrupación de galaxias a lo largo y a través de la línea de visión, que es inducida por las velocidades peculiares de las galaxias que impactan en las mediciones de corrimiento al rojo de sus espectros. Como consecuencia, las distancias inferidas a partir de estos corrimientos al rojo están distorsionadas, por lo que este efecto se denomina distorsiones del espacio de corrimiento al rojo (RSD).

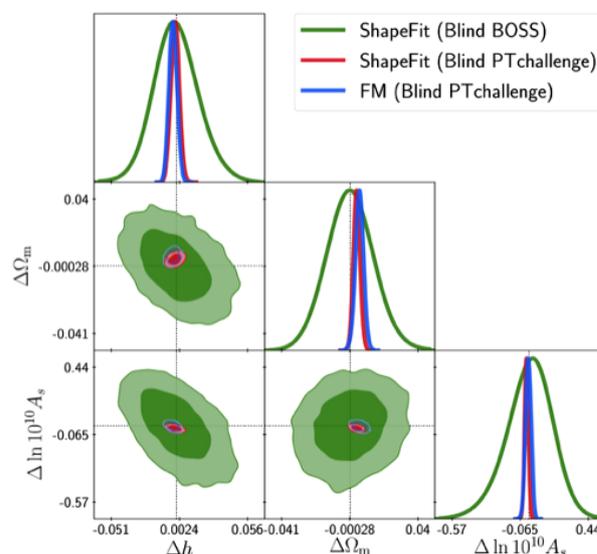
En la primera parte de esta tesis presentamos un método de cegado en los catálogos de galaxias que enmascara la señal real de BAO y RSD. Los futuros datos de DESI se beneficiarán de este cegado para eliminar el impacto del sesgo de confirmación en los resultados cosmológicos. Exploramos dos tipos de desplazamientos para este cegado a nivel de catálogo, perturbando las posiciones individuales de las galaxias a lo largo de la línea de visión. El primero es un desplazamiento puramente geométrico basado en una ley de expansión diferente. En el segundo, los corrimientos al rojo se desplazan en función del campo de densidad de las galaxias imitando una señal de RSD con una tasa de crecimiento modificada. Demostramos que ambos desplazamientos distorsionan las señales de forma coherente al realizar análisis de BAO y RSD en los catálogos originales y cegados.

En la segunda parte, mejoramos el estado del arte en que se realizan los análisis BAO y RSD incluyendo un nuevo observable, la forma de la señal de agrupamiento en función de las separaciones de las galaxias. Mientras que las señales de

BAO y el RSD incorporan la información horizontal y vertical respectivamente en la señal de agrupamiento, la forma capta la información "diagonal". Como demuestra la figura adjunta, encontramos que esta técnica llamada *ShapeFit* es suficiente para obtener mediciones cosmológicas tan precisas como los ajustes directos del modelo a las estadísticas de dos puntos de las galaxias, preservando al mismo tiempo las ventajas de la independencia del modelo de los análisis estándar BAO y RSD. Ambas partes de esta tesis subrayan la importancia del agnosticismo hacia el modelo en el contexto de los grandes sondeos y las tensiones cosmológicas. De tal manera, desempeñan un papel crucial para el análisis cosmológico del sondeo DESI, y proporcionan un camino para la transición entre la "Era de la Precisión" a la "Era de la Exactitud" de la cosmología.

Tesis disponible en:

<https://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/191284>



Esta figura muestra la precisión de ShapeFit en la recuperación de los parámetros cosmológicos subyacentes (indicados con líneas punteadas) de las simulaciones de alta fidelidad construidas para el reto de teorías de perturbaciones a ciegas "Blind PTChallenge" (en rojo) en comparación con la técnica alternativa de modelado directo (FM; en azul) y en comparación con la precisión de vanguardia alcanzada por el experimento BOSS (en verde).

Página opuesta. Izquierda: Visualización 3D del sistema óptico del TMS diseñado en el contexto de la tesis, incluyendo la estructura del telescopio, los espejos en configuración Gregoriana descentrada y el criostato. La bocina en el interior del criostato se encuentra alineada con uno de los focos del espejo secundario. Derecha: Detalle del módulo de *Front-End* en el interior del criostato. Enfatizado en negrita se incluyen los componentes objeto de esta tesis: la carga de referencia de cuerpo negro a 4K, las OMT y los acopladores híbridos. Para mejorar la claridad de la representación, se han eliminado tanto la ventana del criostato como el filtro IR, que se encontrarían a continuación de la bocina denominada como *sky feedhorn*.

Instrumentación para “Tenerife Microwave Spectrometer”

Autora: Paz Alonso Arias

Tesis doctoral dirigida por: Roger John

Hoyland y José Alberto Rubiño Martín

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

Fecha de lectura: 3 de octubre de 2022

El interés por desentrañar la historia térmica del Universo, codificada en la distribución espectral del fondo cósmico de microondas (FCM), ha sido durante mucho tiempo una fuerza impulsora en la comunidad científica. Recientemente se han propuesto nuevas misiones espaciales para detectar distorsiones espectrales a alta frecuencia, aprovechando recientes avances tecnológicos que prometen sensibilidades muy elevadas (los últimos límites establecidos para las distorsiones son de $\sim < 10E-5$ en el rango de ondas centimétricas). Hasta disponer de estos resultados, los experimentos en tierra pueden ser pioneros en este campo, sirviendo como banco de pruebas para diferentes tecnologías y métodos novedosos y completando la información espectral del cielo de microondas. En este escenario, el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) propone y lidera el *Tenerife Microwave Spectrometer* (TMS), un experimento que tomará medidas absolutas de la emisión del cielo entre 10 y 20 GHz desde el Observatorio de Izaña (Tenerife).

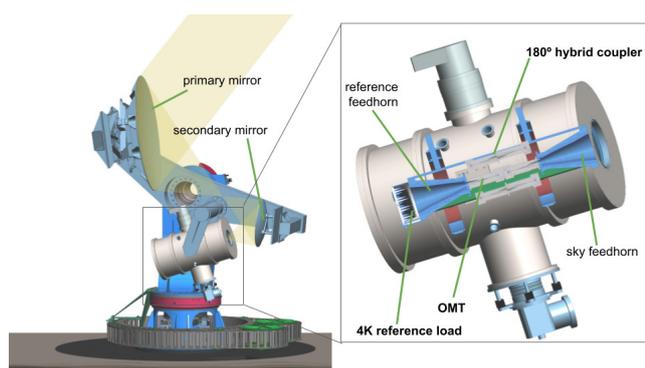
Esta tesis se ha desarrollado en el contexto del experimento TMS y ha abordado principalmente el desarrollo instrumental de una selección de subsistemas clave, incluyendo el diseño y la caracterización de un calibrador interno de cuerpo negro, el diseño del sistema óptico del TMS y de sus filtros, y el diseño del transductor de modos ortogonales (OMT) y del acoplador híbrido de banda ultraancha.

En la primera parte de la tesis se ha simulado el funcionamiento del TMS en condiciones nominales, incluyendo predicciones realistas de la contaminación de cielo y atmósfera en la banda de interés. Hemos verificado nuestra capacidad para reconstruir la temperatura atmosférica y la resolución de características espectrales de hasta 0,6 mK mediante observaciones de tipo *skydip* de corta duración (10 min). También se ha verificado nuestra capacidad para medir el exceso de emisión detectado por el instrumento ARCADE, uno de los principales objetivos científicos de TMS. Se ha confirmado que para detectar esta radiación sin sesgos es necesaria una calibración y estimación diaria de la cantidad de vapor de agua de la atmósfera. La estrategia de observación propuesta incluye observaciones cortas de tipo *skydip*

antes y después de la operación en modo *raster*, para asegurar la correcta caracterización de la variación de la atmósfera.

En la parte central de la tesis, describimos el desarrollo y las pruebas del calibrador interno de cuerpo negro y el diseño del sistema óptico. La carga a 4K de TMS (4KCL) proporcionará una señal de referencia ultraestable para comparar con la señal del cielo. La carga fría consiste en un núcleo de aluminio, compuesto por una base y un lecho de elementos piramidales revestidos con un material absorbente, y un escudo metálico. Su diseño está optimizado para cumplir los estrictos requisitos de estabilidad y homogeneidad térmica, y de emisividad en la banda TMS, entre 10 y 20 GHz. Se han realizado mediciones de reflectividad especular y difusa de la carga en un rango de frecuencias extendido entre 8–24 GHz. La reflectividad especular es mucho mejor que el objetivo de diseño para la mayor parte de la banda de TMS (-40 dB). Se ha comprobado tanto la integridad mecánica frente al estrés térmico, como la homogeneidad térmica del diseño (gradiente de temperatura < 5 mK). Se ha presentado un diseño para el sistema óptico del TMS, maximizando su acoplamiento con el instrumento. El sistema final presenta dos espejos en configuración Gregoriana, e incluye la ventana del criostato (fabricada en UHMWPE) y un filtro de radiación infrarroja IR (en PTFE), así como las estructuras de soporte. Se han realizado mediciones de la reflectividad del prototipo de filtro IR, para verificar que cumple con las especificaciones requeridas ($RL < -25$ dB). Adicionalmente, hemos realizado simulaciones electromagnéticas para caracterizar el comportamiento del sistema, enfocándonos en la variación espectral del haz, la filtración en polarización y el análisis de la región de lóbulos laterales. En la banda de 10–20 GHz, el haz principal presenta menos de 2° , y la filtración de polarización es mejor que el 2,6 % para toda la banda. En la configuración actual, la contribución parásita al ángulo sólido total es menor que aproximadamente el 3,0 %. La estructura de soporte y la visión directa del cielo desde la bocina son los principales contribuyentes a la región de lóbulos laterales. Se ha confirmado la necesidad de una estructura de apantallamiento para minimizar estos lóbulos laterales por debajo del 0,1 % del ángulo sólido total.

Finalmente, se ha abordado el diseño del transductor de modos ortogonales (OMT) y del acoplador híbrido de 180° . El diseño del OMT se basa en la tecnología de guía de ondas de cuatro resaltes o *ridges*, y presenta una geometría altamente simétrica que permite el funcionamiento en todo el ancho de banda de operación del TMS (10–20 GHz). El diseño del OMT garantiza unas pérdidas de retorno (-25 dB), así como niveles de polarización cruzada (-60 dB) óptimas. Además, se garantiza un máximo rechazo de los modos de orden superior que se propagan en la bocina del TMS. El concepto del acoplador híbrido es un diseño frontera basado en el diseño del OMT que permite alcanzar una octava completa de ancho de banda con unas prestaciones en cuanto a adaptación (-25 dB), aislamiento (-60 dB) y rizado ($< 0,1$ dB) excepcionales. El diseño garantiza un mínimo desequilibrio de fase y amplitud de salida en toda la banda de TMS.



Fenómenos meteorológicos en Marte estudiados con la cámara VMC de *Mars Express*

Autor: Jorge Hernández Bernal

Tesis doctoral dirigida por: Agustín Sánchez Lavega y Teresa del Río Gaztelurrutia

Centro: Universidad del País Vasco

Fecha de lectura: 20 de diciembre de 2022

Esta tesis consiste en el estudio de fenómenos meteorológicos en la atmósfera de Marte usando principalmente imágenes obtenidas con la cámara VMC del orbitador *Mars Express*.

VMC es una cámara sencilla, con características similares a las de una *webcam* de los años 2000, y fue enviada a Marte como una simple cámara de ingeniería. Esta tesis se ha desarrollado en el marco del proyecto para convertir esta pequeña cámara en un nuevo instrumento científico, por lo que los desarrollos metodológicos de la tesis han contribuido también a la conversión de VMC en un instrumento científico completamente operativo. Estos desarrollos metodológicos incluyen la calibración fotométrica, geométrica y temporal de VMC; el desarrollo de la *pipeline* de procesado y archivado de datos; la participación en las operaciones de *Mars Express*; y el desarrollo de multitud de sistemas, bases de datos, paquetes de *software*, y aplicaciones para la visualización, procesado y análisis de los datos. Esta base metodológica ha posibilitado el desarrollo de una investigación científica centrada en diferentes fenómenos meteorológicos que resultaban especialmente bien accesibles para VMC y que en cambio eran más difíciles de observar para otros instrumentos y misiones que orbitan Marte. Esto se debe a que VMC, a pesar de sus evidentes limitaciones técnicas, tiene algunas características poco frecuentes en otros instrumentos: 1. La capacidad de obtener imágenes de disco completo desde los apocentros de *Mars Express*. 2. La órbita no heliosíncrona de *Mars Express*, que permite observar horas locales variadas. 3. La capacidad de VMC de tomar largas series de imágenes con las que es posible componer vídeos que muestran la dinámica de los fenómenos meteorológicos.

Así, son tres los fenómenos meteorológicos estudiados en el marco de esta tesis:

- La incidencia de la gran tormenta de polvo de 2018 sobre la región polar sur.
- Las nubes noctilucentes, incluyendo el primer estudio sistemático de este tipo de nubes en Marte, donde son más frecuentes que en la Tierra.

- La nube elongada de Arsia Mons (AMEC). La nube alargada más grande del sistema solar, que se ha descrito en una publicación científica por primera vez.

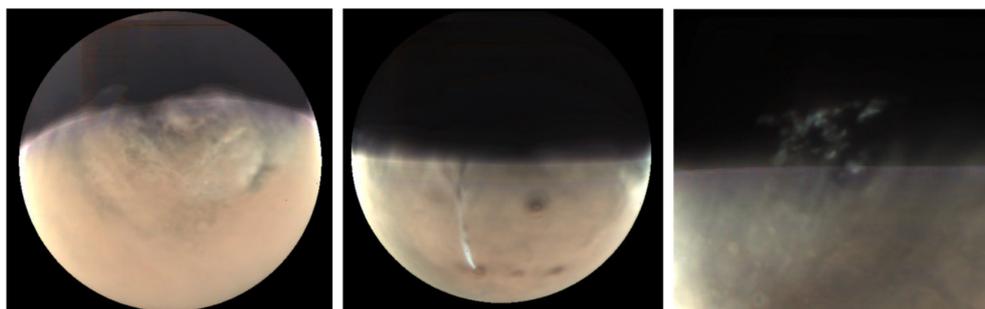
Las observaciones de la región polar sur de Marte durante la tormenta global de 2018 obtenidas por VMC revelan que el polvo penetró de forma inhomogénea en la región y la cobertura de polvo variaba notablemente de unos días a otros. Las observaciones de VMC analizadas en el marco de esta tesis permitieron medir los vientos dominantes en la región polar durante la tormenta y detectar la presencia de enormes bandas de aerosoles penetrando la noche polar.

El segundo fenómeno meteorológico estudiado en el marco de esta tesis son las nubes noctilucentes, que debido a su gran altura reciben la luz del sol durante las horas del crepúsculo y por ello son visibles sobre la oscuridad de la noche en las imágenes de satélite. La mayor parte de las imágenes de Marte obtenidas en las últimas décadas muestran únicamente la hora local del mediodía, pero VMC ha obtenido miles de imágenes del amanecer a lo largo de 15 años. Esto hace de VMC el mejor instrumento disponible para este tipo de estudio. Con el fin de explotar esta capacidad, se desarrolló un *software* capaz de detectar estas nubes y estimar su altura, lo que posibilitó hacer el primer estudio sistemático de las nubes noctilucentes en Marte. Los cientos de nubes catalogadas revelan una distribución estacional y geográfica en parte inesperada, con una abundancia de nubes mesosféricas en latitudes medias nunca antes vista. Estas nubes están probablemente compuestas de cristales de hielo de agua y también de dióxido de carbono.

El tercer fenómeno meteorológico estudiado es la nube elongada de Arsia Mons (AMEC), que alcanza una extensión de hasta 1800 km. Esta nube expresa una dinámica inusualmente rápida, al extenderse en solo tres horas justo después del amanecer y disolverse muy rápidamente. En una primera parte del estudio se emplearon datos de todos los instrumentos de imagen que por sus características podían observar la nube y se hizo una amplia descripción observacional del fenómeno. Posteriormente se ejecutaron simulaciones de alta resolución para intentar comprender la formación de esta inusual nube. Este estudio ha desvelado un mecanismo de formación de nubes orográficas diferente a los que anteriormente se habían contemplado en Marte. Sin embargo, las simulaciones no han dado una explicación a por qué se forma la inusual cola alargada de la AMEC, que por ahora sigue siendo un misterio.

El estudio de estos fenómenos meteorológicos muestra que VMC es una pequeña cámara con mucho potencial científico. Y además revela la riqueza de los fenómenos meteorológicos que se dan en Marte al amanecer, un momento del día escasamente estudiado y que probablemente aún guarda muchos secretos.

Texto disponible en: https://vmc.ehu.eus/jhb_thesis



Izquierda: tormenta global sobre la región polar sur. Centro: la AMEC. Derecha: nubes noctilucentes.

Desentrañando las contribuciones a la emisión óptica de blazars brillantes de rayos gamma a través de estudios de variabilidad

Autor: Jorge Otero Santos

(jorge.otero.santos@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: José Antonio

Acosta Pulido y Josefa Becerra González

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

Fecha de lectura: 24 de febrero de 2023

El objetivo principal de esta tesis es el estudio multifrecuencia de un tipo especial de núcleos activos de galaxias (AGN por sus siglas en inglés) conocidos como *blazars*. Estos objetos poseen un agujero negro supermasivo en su centro. También presentan un chorro (*jet*) amplificado por efectos relativistas que apunta en dirección a la Tierra, actuando como un acelerador de partículas natural, emitiendo en todo el espectro electromagnético, desde longitudes de onda de radio hasta rayos gamma, convirtiéndose en el laboratorio perfecto para estudiar los procesos físicos que tienen lugar en el Universo más extremo. Una propiedad crucial de los *blazars* es su impredecible variabilidad, que puede llevar a estados de mayor emisión con incrementos de flujo de varios órdenes de magnitud. Esta variabilidad puede manifestarse en escalas de tiempo muy diferentes y lleva asociados también cambios tanto en el espectro como en propiedades que pueden ayudar a revelar la física detrás de la emisión de los *blazars*.

En esta tesis presentamos un análisis de la variabilidad de varios *blazars* desde una perspectiva multifrecuencia, desde ondas de radio hasta rayos gamma utilizando datos de diferentes instrumentos y observatorios (por ejemplo OVRO en radio, el Observatorio Steward o WEBT-GASP en visible, o Fermi-LAT y MAGIC en rayos gamma). Con estos datos podemos construir las curvas de luz multifrecuencia que representan la emisión de cada *blazar* y su evolución con el tiempo. En particular, buscamos patrones interesantes en su emisión multifrecuencia como señales periódicas. La variabilidad de los *blazars* es típicamente interpretada a través de procesos estocásticos. Por lo tanto, la detección de este tipo de patrones puede ser de gran interés para revelar los mecanismos que dan lugar a la variabilidad observada. Además, la variabilidad presentada por estos objetos se refleja

también en cambios en su espectro. Este espectro está típicamente dominado por la emisión no térmica del *jet* relativista. Sin embargo, otras componentes como la emisión de la galaxia, la zona de líneas anchas (BLR por sus siglas en inglés) o el disco de acrecimiento pueden contribuir significativamente a su emisión. Separar las diferentes contribuciones a la emisión visible de estas fuentes es un reto debido a la dominancia del *jet*, pero es crucial para estudiar y entender la variabilidad detectada en los *blazars*. Por esta razón, proponemos un estudio de la variabilidad espectral de los *blazars*, aplicando una técnica estadística que nos permite modelar y reconstruir la variabilidad observada a través de un número reducido de componentes que se pueden asociar a las diferentes partes del *blazar*, descomponiendo su emisión visible en función de estas contribuciones. La radiación no térmica del *jet* también está caracterizada por mostrar emisión de luz polarizada debido a la presencia de fuertes campos magnéticos. El estudio de esta polarización es uno de los caminos más útiles para comprender la naturaleza de los campos magnéticos en *jets* de objetos astrofísicos y en el Universo extremo. Programas como RoboPol han comenzado estudios sistemáticos de la polarización de los *blazars* para entender la naturaleza de sus campos magnéticos y su rol en la aceleración de partículas que tiene lugar en el *jet*. Sin embargo, nuevos estudios serán cruciales para llegar a un completo entendimiento del comportamiento de estos campos. Por lo tanto, hemos desarrollado un estudio detallado de diez años de datos espectropolarimétricos, caracterizando su variabilidad, evolución y propiedades para una muestra de *blazars*.

En los últimos años, el desarrollo de la astronomía de rayos gamma y multimensajera ha incrementado el interés de los estudios multifrecuencia en *blazars*. Estos objetos dominan el cielo extragaláctico en rayos gamma, siendo una de las pocas fuentes capaces de acelerar partículas hasta energías de TeV. Por lo tanto, la astronomía de rayos gamma ha emergido como un tema candente en las últimas décadas en el estudio de estos objetos. Estos estudios son posibles gracias a telescopios espaciales como Fermi-LAT y a la actual generación de telescopios Cherenkov (MAGIC, HESS y VERITAS). Estos instrumentos dan acceso a la parte más energética del espectro electromagnético, permitiendo un mejor entendimiento de la emisión de los *blazars*. En este contexto, hemos desarrollado un estudio multifrecuencia del *blazar* 1ES 0647+250, que ha sido observado y detectado por MAGIC durante su período de baja emisión entre 2009 y 2011, así como durante varios eventos de tipo *flare* en 2014, 2019 y 2020. Utilizando datos multifrecuencia desde radio a rayos gamma hemos estudiado su variabilidad y las correlaciones entre las diferentes bandas. También hemos caracterizado su espectro y construido su distribución espectral de energía (SED por sus siglas en inglés). Con esta SED somos capaces de modelar e interpretar la emisión de la fuente en el marco de diferentes modelos teóricos.

Tesis disponible en: <https://www.educacion.gob.es/teseo/mosstrarRef.do?ref=2372199>



Representación artística de una galaxia activa. Crédito: ESA, NASA, STScI.

Parámetros astrofísicos de enanas M con exoplanetas

Autor: Carlos Cifuentes San Román

(ccifuentes@cab.inta-csic.es)

Tesis doctoral dirigida por: José Antonio Caballero, y Jorge Sanz Forcada

Centro: Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)

Fecha de lectura: 24 de marzo 2023

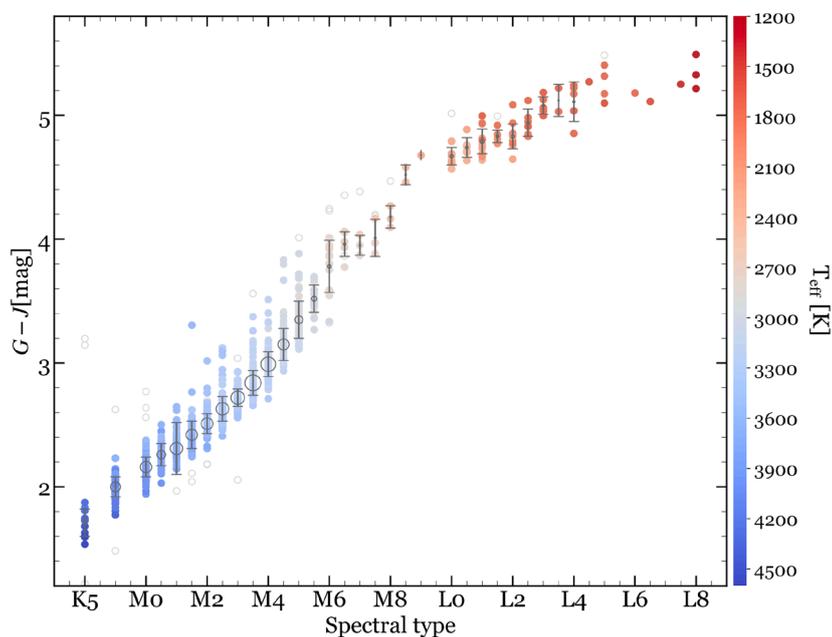
En esta tesis se estudian las enanas M, que son las estrellas más abundantes en el Universo. En estas estrellas más pequeñas, los planetas son mucho más evidentes y en muchos casos pueden describirse con notable detalle. Lo que marca la diferencia en esta tarea es cómo de bien podemos caracterizar la estrella anfitriona. Esto incluye el modelado adecuado de sus atmósferas, su abundancia en metales y sus procesos de actividad. Si se describen adecuadamente de manera individualizada, estas numerosas estrellas tienen el potencial de proporcionar conclusiones estadísticamente robustas cuando se combinan en muestras más grandes. Este trabajo estudia más de 2200 enanas M en Carmencita, que es el catálogo de entrada de enanas M para el proyecto CARMENES. Este tiene como objetivo buscar planetas del tamaño de la Tierra potencialmente habitables orbitando alrededor de ellas.

Esta tesis contribuye a la descripción de cada una de estas enanas M, incluyendo la astrometría, fotometría, actividad, cinemática y multiplicidad, pero también al estudio de la muestra en su conjunto. Llevamos a cabo un proceso exhaustivo que

implica el análisis de datos fotométricos en múltiples bandas y astrométricos. Con un examen minucioso de cada estrella y sus posibles compañeros físicos, hemos puesto especial énfasis en la inspección individualizada en lugar de en las búsquedas masivas, y en la selección manual de datos en lugar de cruces completamente automatizados con bases de datos. Derivamos homogéneamente luminosidades estelares que son eminentemente empíricas, temperaturas, masas y radios, así como muchos productos intermedios como correcciones bolométricas, magnitudes absolutas y colores. A partir de estos, obtenemos valores promediados y relaciones empíricas entre los parámetros fundamentales y las observables. Además, abordamos el tema de la multiplicidad de las enanas M, describiendo detalladamente los sistemas múltiples existentes y sus componentes, proponiendo también la existencia de muchas parejas descubiertas por primera vez. Nos enfocamos en los sistemas binarios no resueltos que pasan desapercibidos sin estudios espectroscópicos, pero que conducen a una imagen incompleta de la formación estelar y a cálculos erróneos de los parámetros estelares, lo que afecta negativamente a las descripciones planetarias.

Las observaciones empíricas presentadas en este estudio proporcionan un importante punto de referencia para poner a prueba y mejorar las predicciones teóricas, ya que cualquier modelo de formación y evolución estelar debería ser capaz de explicar las características observadas de estas estrellas. Al tomar un enfoque cuidadoso e individualizado para el análisis de las enanas M, esperamos que la gran cantidad de datos recopilados en esta tesis sirva como un recurso valioso para astrónomos e investigadores en campos relacionados, y que inspire nuevas investigaciones y nuevas perspectivas sobre los procesos que dan forma al Universo.

Tesis disponible en: <https://arxiv.org/abs/2305.08893>



Color G-J en función del tipo espectral. Los círculos grises vacíos indican el color promedio para cada tipo espectral, con un tamaño proporcional al número de estrellas, y las barras verticales representan su desviación estándar en los tipos espectrales con más de un valor de color válido. Los círculos vacíos de color claro en el fondo representan datos fotométricos incorrectos y sus valores no se tienen en cuenta en los cálculos de los colores promedio.

Imagen en el visible de la materia oscura que nos rodea, y que constituye aproximadamente el 85% de la materia del universo.



**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