



SEA

Sociedad Española de Astronomía



Portada: Una de las primeras imágenes tomadas por EUCLID, una espectacular y detallada panorámica de la Nebulosa de la Cabeza de Caballo, a 1375 años luz, tras una hora de observación.

Créditos: ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA.

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

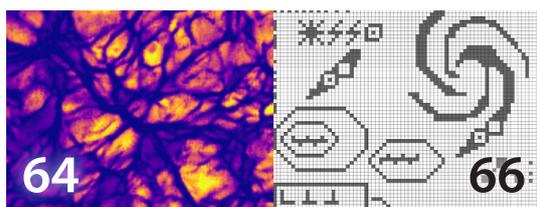
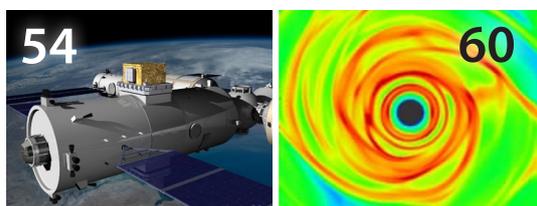
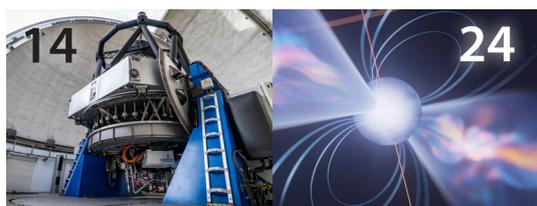
Sociedad Española de Astronomía SEA

www.sea-astronomia.es

Comisión de Información

comi-info@sea.am.ub.es

CONTENIDOS



- 5 Editorial
- 6 Euclid: investigando el universo oscuro
- 14 J-PAS en marcha: el cielo en 57 colores
- 24 NANOGrav: Escuchando el murmullo del cosmos
- 34 20 años MAGICos
- 46 Calar Alto: 50 años observando los cielos desde Almería
- 54 La misión espacial HERD
- 60 ASTRONET: dos décadas de coordinación de la astronomía para Europa
- 64 Proyecto COSMICBRAIN
- 66 Telegrama a un planeta: ¿Hay alguien ahí?
- 76 Ecos de (la) Sociedad
- 77 Libros
- 78 Tesis doctorales

El contacto con civilizaciones alienígenas tienen también su cabida en las aulas, motivando la curiosidad y el debate. Crédito: NRAO/AUI/NSF.



EDITORIAL

Sin duda estamos en la era de la exploración del Universo mediante mapeados de grandes áreas del cielo, que nos permiten llevar a cabo una caracterización sistemática del cielo. En este número hablamos de la misión Euclid que fue puesta en órbita con éxito y está ya en operación, así como también hablamos del cartografiado J-PAS realizado desde el observatorio de Javalambre. Sin olvidar otro de los grandes hitos científicos de este año, que ha sido la evidencia encontrada por la colaboración NANOGrav sobre la existencia de un fondo de ondas gravitacionales.

También celebramos dos cumpleaños en este boletín, por un lado los 20 años de los telescopios Cherenkov MAGIC, situados en el Observatorio del Roque de los Muchachos, y las “bodas de oro” con sus 50 años de operación del Observatorio Calar Alto.

Como en cada boletín, también miramos al futuro. En esta edición contamos con la misión espacial de rayos cósmicos HERD y una visión de ASTRONET como coordinación de la astronomía en Europa.

Por último, el proyecto COSMICBRAIN, diseñado para construir puentes entre la cosmología y la neurociencia, nace con una interesante perspectiva. Y acabaremos con el programa de divulgación para centros educativos “Telegrama a un planeta”, que nos acerca la importancia de la comunicación, más allá de con los terrícolas.

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

¡Feliz solsticio!

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

EUCLID: INVESTIGANDO EL UNIVERSO OSCURO

La materia oscura y la energía oscura dominan el comportamiento del universo. Entenderlas es uno de los mayores retos de la cosmología en la actualidad. Recientemente, hay muchos estudios que se han diseñado y se están llevando a cabo para esclarecer su naturaleza. La Agencia Espacial Europea ha liderado el desarrollo de la misión Euclid, que fue lanzada al espacio el 1 de julio del 2023. Euclid cuenta con un telescopio de 1.2m de diámetro y con dos instrumentos, uno en el visible y otro en el infrarrojo cercano, que han sido especialmente diseñados para proporcionar un campo de visión muy amplio y con una buena calidad de imagen. Euclid tiene una vida útil nominal de seis años durante la cual llevará a cabo un cartografiado de un tercio del cielo. Euclid investigará, utilizando técnicas de lentes gravitacionales y de agrupamiento de galaxias, la estructura y la evolución del universo.



Francisco Javier Castander Serentill
Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC)
ffc@ice.csic.es
Rafael Rebolo López
Instituto de Astrofísica de Canarias
rrl@iac.es

En representación del Consorcio de Euclid en España

La cosmología aglutina los interrogantes de la humanidad para intentar comprender el universo donde vivimos. La cosmología moderna empezó a principios del siglo XX y se asienta en dos pilares fundamentales: el principio cosmológico y la teoría general de la relatividad general. El primero asume que el universo cuando se observa en escalas suficientemente grandes es igual para cualquier observador y por tanto las leyes de la física son las mismas en cualquier lugar. El segundo describe cómo se comporta el universo en presencia de materia y energía, y el desarrollo de sus ecuaciones nos permite entender su comportamiento y evolución global. A lo largo del siglo XX, las observaciones nos han ido ayudando a entender cada vez mejor la composición y el funcionamiento del cosmos. El descubrimiento de la expansión del universo, el estudio de la dinámica de las galaxias y de los cúmulos de galaxias, el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo y el estudio del agrupamiento de las galaxias son hitos que nos han proporcionado pistas esenciales para entender el universo. A finales del siglo XX, especialmente con los resultados de los estudios de supernovas, hemos comprobado que el universo se está expandiendo de manera acelerada. Un comportamiento difícil de entender puesto que esperaríamos que la gravedad, como fuerza atractiva que es, redujese el ritmo de esta expansión. A la causa que produce esta aceleración la denominamos energía oscura, que puede ser debida a un fluido extraño o a leyes de la física que todavía nos son desconocidas.

En las últimas décadas, hemos logrado enormes avances en la determinación de los constituyentes básicos del universo, que marcan su comportamiento. Gracias a las observaciones de la radiación cósmica de fondo, del agrupamiento de galaxias y de supernovas, ahora sabemos que el universo está formado aproximadamente por un 5% de materia bariónica ordinaria, un 25% de materia oscura y un 70% de energía oscura. Sin embargo, no tenemos idea de la naturaleza de estos dos últimos componentes. Es decir, desconocemos lo que constituye el 95% del universo.

Para abordar posibles soluciones a esta cuestión, tenemos que investigar la estructura general y la evolución del universo y sus constituyentes. Desde el punto de vista de la observación, se necesitan estudios de gran envergadura que sondeen áreas amplias y que alcancen una profundidad que nos permita medir en

detalle la evolución de las estructuras en la distribución de las galaxias. De hecho, una cuestión fundamental en Cosmología es establecer cómo se han formado y evolucionado las estructuras que observamos hoy. Para poder comprender completamente las estructuras que observamos, necesitamos caracterizar cómo la materia visible, los bariones, interactúa con la materia y energía oscuras que impulsan la dinámica gravitacional del universo. El contenido de densidad de energía del universo también juega un papel clave en el crecimiento de su estructura a gran escala.

En la primera década del siglo XXI, los comités asesores de las principales agencias financiadoras de la investigación delinearon la manera de abordar mediante observación una mejor comprensión del universo. Identificaron cuatro técnicas de observación principales que son las más sensibles a las propiedades de la energía oscura: las supernovas de tipo Ia,

las lentes gravitacionales, los cúmulos de galaxias y el agrupamiento de las galaxias, incluidas las oscilaciones acústicas de bariones (BAO) y las distorsiones espaciales de desplazamiento al rojo (RSD). En los últimos años ha habido un esfuerzo considerable para seguir estas recomendaciones y diseñar y construir instrumentación que permita llevar a cabo grandes estudios cosmológicos y establecer con mayor precisión las propiedades generales de nuestro universo.

Respondiendo a esta necesidad, la Agencia Espacial Europea (ESA) adoptó la misión cosmológica Euclid como su segunda misión de clase media, M, dentro de su Programa de Visión Cósmica 2015-25. La comunidad científica europea ha acogido este esfuerzo con entusiasmo y un número récord de más de dos mil astrónomos y cosmólogos se han inscrito en el Consorcio de Euclid y trabajado para que esta misión sea un éxito.

Euclid en Cabo Cañaveral el 23 de junio de 2023 antes de ser acoplado al lanzador Falcon 9. Crédito de la imagen: ESA.



LOS ORÍGENES DE EUCLID

Una de las técnicas más prometedoras para el estudio de la energía oscura es el estudio de las deformaciones por efectos de lentes gravitacionales, que dependen de la geometría del universo y de cómo la materia se agrupa. Desde observatorios terrestres su estudio se complica debido a las distorsiones de la atmósfera. La misión DUNE se propuso a la ESA para realizar un estudio de los efectos de lentes gravitacionales desde el espacio.

Otra técnica fundamental para el estudio de la energía oscura es el estudio del agrupamiento de las galaxias. En particular, la escala del BAO es una medida de la geometría del universo y las RSD son indicadoras de cómo se comporta la gravedad. El estudio desde el espacio permite acceder a la parte infrarroja del espectro y estudiar estos indicadores a un desplazamiento al rojo más alto y por tanto a una edad más temprana del universo. La misión SPACE se propuso a la ESA para llevar a cabo estos estudios desde el espacio.

La Agencia Espacial Europea decidió juntar ambas misiones. El resultado de varios estudios condujo al concepto de la misión Euclid como amalgama de las dos misiones anteriores. Euclid se presentó a la selección de misiones dentro del programa de Visión Cósmica 2015-25 de la ESA y fue finalmente

seleccionada como su segunda misión del tipo medio M en octubre del 2011, el mismo día en que se concedió el premio Nobel por el descubrimiento de la expansión acelerada del universo por el estudio de supernovas. Desde entonces la ESA, las empresas Thales Alenia como contratista principal y Airbus como responsable del módulo de carga útil y el consorcio de Euclid, responsable de los instrumentos de la carga útil y del segmento científico de tierra junto a la ESA han venido desarrollando la misión, que finalmente se lanzó con éxito el día 1 de julio del 2023.

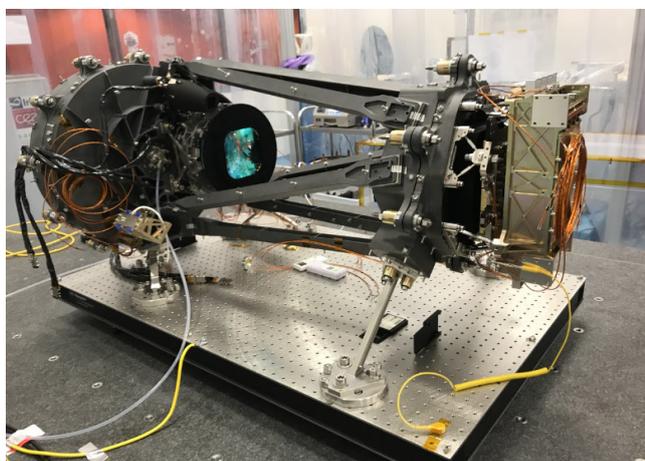
LOS INSTRUMENTOS Y EL SEGMENTO CIENTÍFICO DE TIERRA DE EUCLID

Euclid consiste en un telescopio de 1.2m de diámetro con un diseño anastigmático de tipo Korsch de tres espejos que proporciona un amplio campo de visión con mínimas distorsiones.

Euclid tiene dos instrumentos científicos: el instrumento de imagen visible (VIS) y el espectrógrafo y fotómetro en infrarrojo cercano (NISP). El camino óptico tiene un dicroico que refleja la luz al instrumento visible, VIS, y la transmite al instrumento infrarrojo, NISP.

El instrumento VIS consiste en un plano focal de 36 detectores CCD de e2v dispuestos en una matriz de 6 x 6. Los detectores son de 4k x 4k píxeles y proporcionan una escala de 0.1" por píxel en el

El Instrumento NISP antes de la instalación del aislante externo (izquierda) y después (derecha). Crédito de la imagen: Euclid Consortium.





Plano focal completamente ensamblado del instrumento VIS. Crédito de la imagen: CEA.

cielo. El campo de visión de VIS es de 0.54 deg^2 . De esta manera, VIS proporciona un campo de visión amplio con una buena resolución para poder hacer estudios de lentes gravitacionales. Los diversos revestimientos de las superficies ópticas y la eficiencia cuántica de los detectores proporcionan un filtro efectivo, IE, con transmisión entre las longitudes de onda de 530 a 920 nm.

El instrumento NISP consta de 16 detectores de Teledyne Hawaii 2GR de $2k \times 2k$ dispuestos en una matriz de 4×4 . La escala del píxel es $0.298''$. NISP tiene un campo de visión de 0.57 deg^2 . El instrumento NISP cuenta con una rueda de filtros y una rueda de grismas que permite hacer imagen en tres bandas en el infrarrojo cercano, Y_E , J_E y H_E y espectroscopía sin rendija con un grisma "azul", BG, que cubre las longitudes de onda de 926 a 1326 nm y tres grismas "rojos", RG, que cubren de 1206 a 1892 nm. Ambos grismas tiene una resolución aproximada de 400. Los tres grismas rojos tienen diferentes orientaciones para permitir resolver la confusión por el solapamiento de los espectros.

Estos dos instrumentos permiten tomar imágenes en el óptico con gran resolución en un campo de visión muy amplio y también imágenes en el infrarrojo cercano en tres bandas y tomar espectros sin rendija en la misma región del cielo que el instrumento vi-

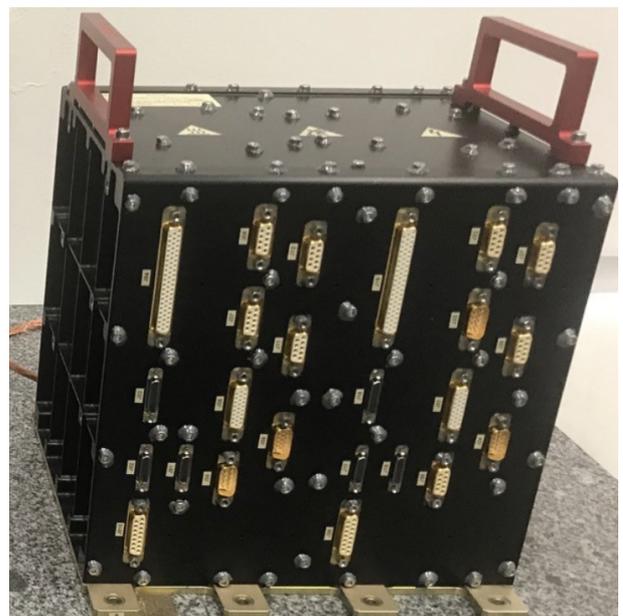
sible. Para complementar la fotometría desde el espacio, que sólo dispone de una banda amplia en el óptico, Euclid necesita imágenes a una profundidad similar en el óptico con los filtros tradicionales más estrechos para poder caracterizar las distribuciones espectrales de energía y así poder determinar los desplazamientos al rojo fotométricos de las galaxias.

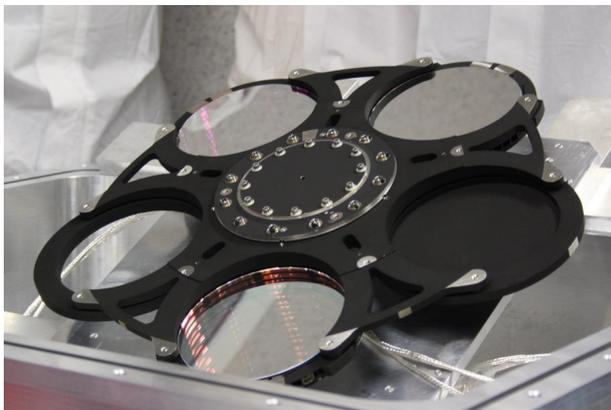
Otra parte importante de la misión la constituye el Segmento Científico de Tierra (SGS), que es el responsable de tratar y analizar los datos que proporciona el satélite además de los datos adicionales necesarios tomados desde tierra. El SGS se divide en diferentes unidades de organización (OU) para cubrir cada una de las fases del procesado de datos y cuenta con centros de datos científicos (SDC) en diferentes países que soportan el cómputo necesario de las diferentes OUs.

LA CONTRIBUCIÓN ESPAÑOLA

La contribución española a la misión Euclid empezó con sus predecesoras, DUNE y SPACE. Después de las fases preliminares de estudio y de negociación, España se comprometió a través del Multi-Lateral

Unidad de control del instrumento (ICU) completamente ensamblada. Crédito de la imagen: Euclid Consortium.





Rueda de Filtros (FWA) del instrumento NISP. Crédito de la imagen: Euclid Consortium.

Agreement (MLA) firmado con la ESA y las otras agencias financiadoras a financiar la unidad de control del instrumento (ICU) y la rueda de filtros (FWA) del instrumento NISP y la unidad de organización de simulaciones (OU-SIM) y el centro de datos científico español (SDC-ES) del SGS.

Los grupos de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) y del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) han sido los responsables de diseñar, construir, testear y entregar la ICU del instrumento NISP. A esta

labor ha contribuido la empresa Airbus Crisa. Los grupos del Institut de Física d'Altes Energies (IFAE), el Instituto de Ciencias del Espacio (ICE-CSIC) y el Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC) han sido los responsables de la FWA del instrumento NISP. Los grupos del ICE-CSIC y del IEEC son los responsables y coordinadores de OU-SIM del SGS. El Port d'Informació Científica (PIC) es el SDC-ES.

Además de las contribuciones especificadas en el MLA, desde España también se contribuye a la gobernanza del proyecto y a la preparación del análisis científico. Participamos en el equipo de ciencia de Euclid (EST) de la ESA. Hemos dirigido el Consorcio de Euclid los años 2020 y 2021. Lideramos el grupo de trabajo de simulaciones cosmológicas, y el grupo de modelos no lineales. También contribuimos a otros grupos de trabajo y tenemos uno de los dos *Independent Legacy Scientists* de la misión. En la actualidad hay más de cien participantes españoles activos en el Consorcio de Euclid.

LAS PRIMERAS ETAPAS DE EUCLID

Euclid se lanzó al espacio el día 1 de julio de 2023 desde Cabo Cañaveral con un cohete Falcon 9 de la empresa SpaceX. El lanzamiento estaba previsto con un Soyuz desde Kourou, pero la guerra de Ucrania imposibilitó el lanzamiento previsto. Tras unos



Lanzamiento de Euclid el 1 de julio de 2023 desde Cabo Cañaveral. Crédito de la imagen: ESA.



Composición de las primeras imágenes de Euclid (EROs). Arriba izquierda: galaxia espiral IC 342; arriba medio: nebulosa de la cabeza de caballo; arriba derecha: cúmulo globular NGC 6347; abajo izquierda: galaxia irregular NGC 6822; abajo derecha: cúmulo de galaxias de Perseo. Crédito de la imagen: ESA / Euclid Consortium / NASA / J.C. Cuillandre y G. Anselmi.

meses de incertidumbre, finalmente la ESA llegó a un acuerdo con SpaceX que culminó con un lanzamiento exitoso con un tiempo de preparación muy corto.

Después de su lanzamiento, Euclid viajó en un mes al punto de Lagrange L2 donde ahora se encuentra siguiendo una órbita de Lissajous. La primera fase de la misión fue la puesta en marcha del telescopio y de los instrumentos que se llevó a cabo en el mes de julio y comienzos de agosto. Se optimizó el foco del telescopio y se comprobó que los instrumentos funcionaran. Después empezó la fase de verificación del rendimiento que incluía un programa completo de calibraciones que a finales de noviembre se ha completado. En estas primeras fases se ha podido corroborar la calidad de imagen excepcional del telescopio y el rendimiento que cumple con los requisitos de diseño.

No obstante, ha habido tres contratiempos que no se esperaban. En primer lugar, en ciertas orientaciones del telescopio respecto al Sol entra luz parásita. También, cuando se produce una tormenta solar, el flujo de rayos X resultante traspasa el aislamiento de las placas solares y deposita radiación en los detec-

tores del instrumento VIS. Y, por último, el sistema de apuntado fallaba en algunas ocasiones debido al alto flujo de rayos cósmicos. Pero estas inesperadas ocurrencias no inhabilitan la misión y se han logrado solucionar en parte sus efectos. La luz parásita ha obligado a cambiar la estrategia de apuntados del cartografiado para evitarla. Las tormentas de rayos X es algo inevitable y eso hará perder algo de eficiencia a la misión. El software de apuntado ha sido mejorado y ya no se producen pérdidas de guiado.

Durante estas primeras fases, la ESA programó observaciones de diferentes objetos para demostrar las capacidades de Euclid. El 7 de noviembre hizo públicas las imágenes de estas observaciones tempranas (EROs). Estas imágenes incluyen un cúmulo de galaxias, una galaxia espiral local, una galaxia irregular, un cúmulo globular y una nebulosa con formación estelar, que permiten ilustrar el potencial de descubrimiento de Euclid evidenciando la calidad de imagen y el amplio campo que proporciona.

EL CARTOGRAFIADO DE EUCLID

En diciembre del 2023 empezó el cartografiado de Euclid, que tiene una duración prevista de seis años

en los que cubrirá unos 14000 deg², aproximadamente un tercio del cielo, evitando el plano galáctico y la eclíptica, donde la alta densidad estelar y el fondo de cielo más brillante hacen el cartografiado extragaláctico menos eficiente.

Las observaciones consisten en ir cubriendo el cielo con un patrón prediseñado de apuntados. Cada apuntado consta de 4 tomas de datos en posiciones con un ligero desplazamiento, siempre con el mismo patrón. En cada una de estas posiciones se toma una imagen con el instrumento visible y simultáneamente espectros sin rendija con el instrumento NISP. Después se toman imágenes en el infrarrojo cercano sucesivamente con los tres filtros: J_E , H_E y Y_E .

Con esta estrategia de observación, se llegará a una profundidad de magnitud AB de 24.5 a 10σ para fuentes extensas en el filtro visible I_E y a 24.0 a 5σ para fuentes puntuales en los filtros del infrarrojo cercano. La espectroscopía permitirá detectar líneas de emisión de un flujo 3×10^{-16} erg cm⁻² s⁻¹ con una significancia de 3.5σ .

Estas observaciones se complementarán con observaciones desde tierra en los filtros ópticos que se obtienen de los cartografiados UNIONS (CFHT, Pan-STARRS y Subaru), DES y Rubin-LSST. La combinación de estos datos con los de Euclid permitirá tener una buena caracterización de la distribución espectral de energía de las galaxias que se observen, y así poder obtener unas estimaciones precisas de los desplazamientos al rojo con métodos fotométricos, necesarios para los estudios tomográficos de lentes gravitacionales débiles.

Además del cartografiado amplio del cielo, Euclid incluirá observaciones en tres campos profundos (Euclid Deep Fields) en los que se observará a dos magnitudes más de profundidad, con el objetivo de caracterizar las poblaciones de galaxias que se estudian en el cartografiado amplio y entender la función de selección. Además, hará posible otros estudios astrofísicos no cosmológicos con estos datos de alta calidad en un área considerable.

LA CIENCIA DE EUCLID

Los observables principales para determinar el modelo cosmológico que mejor describe el universo en que

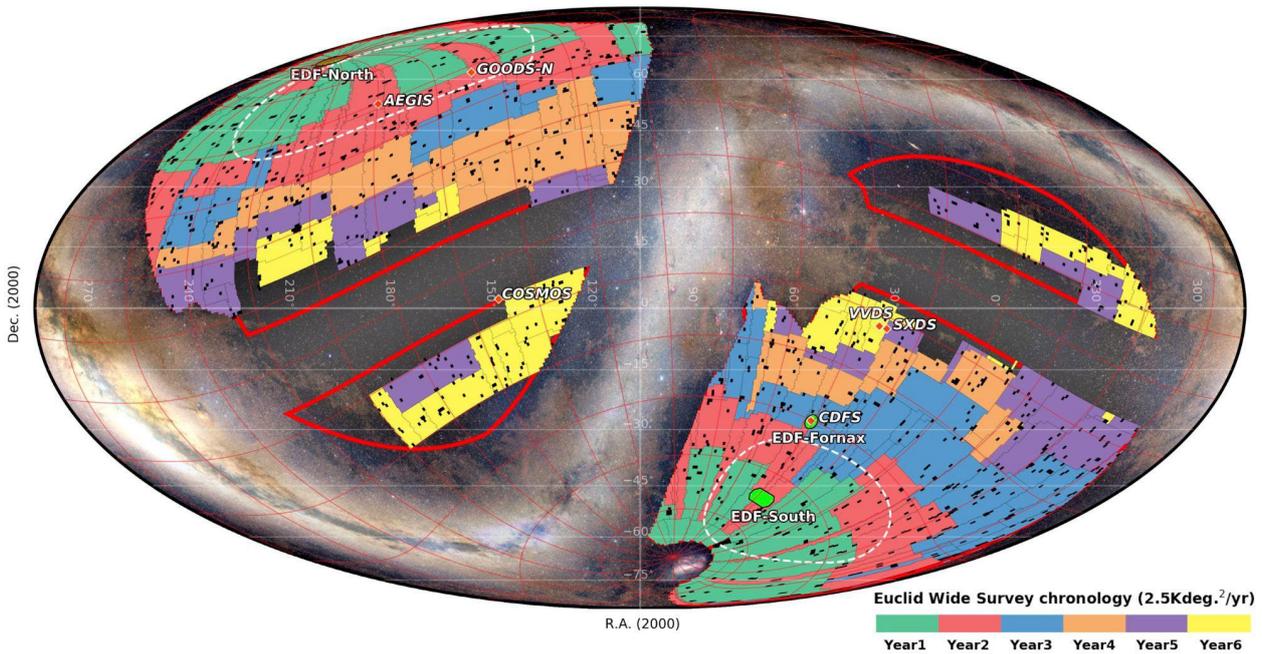
vivimos es el estudio del ritmo de expansión del universo, que depende de su contenido de materia y energía y por tanto de su geometría; y el estudio del agrupamiento de las estructuras, que depende del comportamiento de la gravedad y también de la geometría.

Los objetivos fundamentales de Euclid son: 1) estudiar la energía oscura determinando su ecuación de estado, 2) poner a prueba nuestra descripción de la fuerza de la gravedad, y si se corresponde con la teoría General de la Relatividad, 3) estudiar la naturaleza de la materia oscura, y en particular la masa de los neutrinos, y 4) estudiar el origen de la estructura cósmica, y en particular el índice espectral del espectro de fluctuaciones primordiales, su amplitud y su gaussianidad.

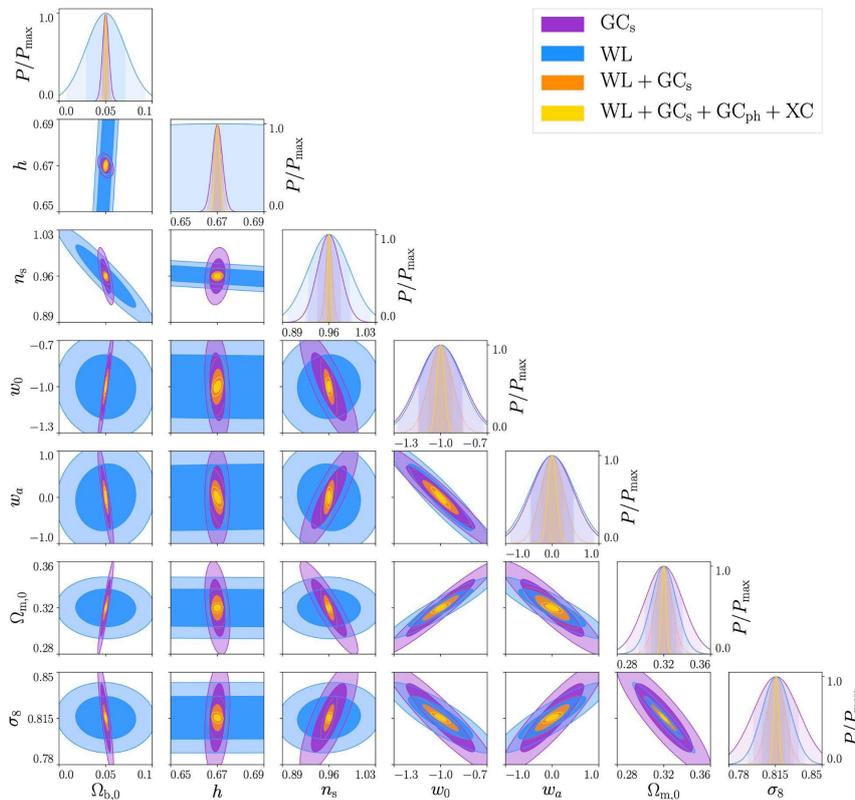
Los dos principales observables cosmológicos de Euclid son el estudio de lentes gravitacionales y el estudio del agrupamiento de las galaxias. Para ello, se determinará la forma y tamaño de miles de millones de galaxias y se determinará el desplazamiento al rojo de decenas de millones de galaxias. Con ambos observables, se determinará el parámetro de la ecuación de estado de la energía oscura con una precisión del 2%, obteniendo una figura de mérito, FoM > 400, que es una estimación de los errores en su valor y en su primera derivada, y es uno de los parámetros utilizados por la ESA para optimizar la misión.

Además de los estudios cosmológicos, como han podido evidenciar las observaciones de los EROs, la amplitud y calidad de los datos permitirá una infinidad de otros estudios astrofísicos, entre los cuales se puede mencionar estudios de objetos a alto desplazamiento al rojo en la época de reionización, estudios de la estructura y morfología galáctica, galaxias activas, la evolución de la formación estelar, la física de los cúmulos de galaxias, objetos transitorios, el grupo local, estrellas frías, objetos subestelares y objetos del sistema solar.

Los datos de Euclid se harán públicos 14 meses después de ser adquiridos con una periodicidad anual para que la comunidad internacional pueda aprovechar y estudiar la riqueza de los datos que esta misión espacial adquirirá. Tenemos un emocionante y esperanzador futuro en perspectiva.



Distribución en el cielo del cartografiado de Euclid, incluyendo los tres campos profundos (EDF). El código de color indica el año en que se cubrirá esa parte del cielo. El cartografiado está ahora en proceso de actualización y por tanto no será exactamente como el indicado en la figura. Imagen obtenida de Euclid Collaboration: Scaramella et al 2022, A&A, 662, A112.



Predicción en la estimación de los parámetros cosmológicos con la misión Euclid, dependiendo de la información empleada: GC_s: agrupamiento de galaxias espectroscópico, WL: lentes gravitacionales débiles, GC_{ph}: agrupamiento de galaxias espectroscópico, XC: correlaciones cruzadas. Imagen obtenida de Euclid Collaboration: Blanchard et al 2020, A&A, 642, A191.

J-PAS EN MARCHA: EL CIELO EN 57 COLORES

J-PAS ha comenzado a observar el cielo desde Javalambre con 54+3 filtros en el óptico produciendo foto-espectros de resolución $R \sim 60$ para cada objeto detectado. Estos espectros permiten medir foto-zs con un error menor de 0.3% para la mitad de las galaxias y cuásares, así como determinar la gravedad en superficie, temperatura efectiva, y metalicidad para las estrellas de nuestra Galaxia, como demuestran los cartografiados piloto miniJPAS y J-NEP.



Antonio Marín-Franch
amarin@cefca.es

Carlos López Sanjuan
clsj@cefca.es

Centro de Estudios de
Física del Cosmos de Aragón

José M. Vílchez
Instituto de Astrofísica de Andalucía - CSIC
jvm@iaa.es

Silvia Bonoli
Donostia International Physics Center
silvia.bonoli@dipc.org

Carlos Hernández Monteagudo
Instituto de Astrofísica de Canarias
carlos.hernandez.monteagudo@iac.es

En representación de la Colaboración J-PAS

El Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ, <https://oajweb.cefca.es>) ha comenzado a tomar los primeros datos del proyecto J-PAS (Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey, <https://www.j-pas.org>), un ambicioso cartografiado fotométrico sin precedentes planificado para llevarse a cabo a lo largo de esta década. Este proyecto, liderado por el Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA), el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), el Observatorio Nacional de Río de Janeiro y la Universidad de Sao Paulo, tiene como objetivo observar miles de grados cuadrados del cielo visible desde Javalambre empleando un novedoso conjunto de 54 filtros estrechos contiguos complementados con 3 filtros de banda intermedia y ancha.

Definido y optimizado para poder avanzar en nuestro conocimiento de la estructura a gran escala del Universo, se espera que J-PAS contribuya a la comprensión de la energía oscura, permitiendo el estudio, a su vez, de cientos de millones de estrellas, galaxias, supernovas, cuásares, objetos de nuestro Sistema Solar, etc., con una técnica observacional única. De hecho, J-PAS proporcionará un espectro de baja resolución para cada píxel observado del cielo. En este sentido, J-PAS se plantea como un proyecto de legado para la comunidad científica internacional, que ofrece múltiples sinergias y una visión única del Universo.

El proyecto J-PAS y sus motivaciones científicas probablemente les resulten familiares a los lectores habituales del boletín de la SEA, ya que en el invierno de 2019 le dedicó un artículo a J-PAS. En aquel momento el proyecto contaba con un grado cuadrado observado en las 54+3 bandas cubriendo la *Extended Groth Strip*, llamado miniJPAS, cuyos datos se hicieron públicos a la comunidad internacional en diciembre de 2019 (<https://archive.cefca.es/catalogues/minijpas-pdr201912>) en una reunión abierta auspiciada por la RIA. Desde entonces hemos seguido avanzando y el presente artículo presenta las novedades principales del proyecto J-PAS en los últimos cuatro años. Presentamos la puesta en marcha de JPCam, instrumento diseñado y optimizado para llevar a cabo J-PAS, así como la explotación científica con más de 20 artículos publicados de los datos de miniJPAS y de J-NEP, un segundo campo de 0.25 grados cuadrados cerca del *North Ecliptic Pole* observado con idéntico sistema de filtros y, finalmente el comienzo de las observaciones de J-PAS, con unos 30 grados cuadrados cubiertos hasta la fecha y avanzando ya a velocidad de crucero.

JPCAM, UNA CÁMARA DE GRAN CAMPO DE VISIÓN Y 1.2 GIGAPÍXELES PARA EL JST250

J-PAS se está llevando a cabo con el *Javalambre Survey Telescope* (JST250) del OAJ, un telescopio de gran *etendue* de 2.55 metros de apertura y 3 grados (diámetro) de campo visión que ha sido concebido para llevar a cabo grandes cartografiados. El JST250 (imagen 1) es un telescopio altazimutal con una configuración tipo Ritchey-Chrétien y una relación focal de $f/3.5$. El plano focal corresponde a un diseño Cassegrain. El telescopio está equipado con un corrector de campo complejo de 3 lentes de diámetros en el rango de 500–600 mm y con 4 de las superficies ópticas asféricas. Los dos espejos y las tres lentes están diseñados para optimizar la calidad de imagen policromática y mantener una baja distorsión en todo el campo de visión.

El instrumento científico principal del JST250 es JPCam, una cámara de 1.2 gigapíxeles concebida especialmente para llevar a cabo el cartografiado J-PAS, maximizando el campo de visión, cobertura espectral y calidad de imagen en todo el plano focal. Se trata de una cámara de imagen directa y gran campo de visión equipada con un mosaico de 14 detectores de gran formato y bajo ruido electrónico CCD290 de Teledyne-e2v, de 9.2k por 9.2k píxeles. Integrada en el foco Cassegrain del JST250, JPCam proporciona un campo de visión efectivo de 4.1 grados cuadrados con una escala de placa de 0.23 segundos de arco por píxel. Cada detector científico se lee de manera sincronizada por 16 puertos lo que permite, en su modo nominal, una lectura de todo el plano focal en 10.9 segundos (*full frame*) o 6.1 segundos (*binning 2x2*), con un

Figura 1. El *Javalambre Survey Telescope* (JST250) del Observatorio Astrofísico de Javalambre y su instrumento científico principal JPCam, integrado en el foco Cassegrain.



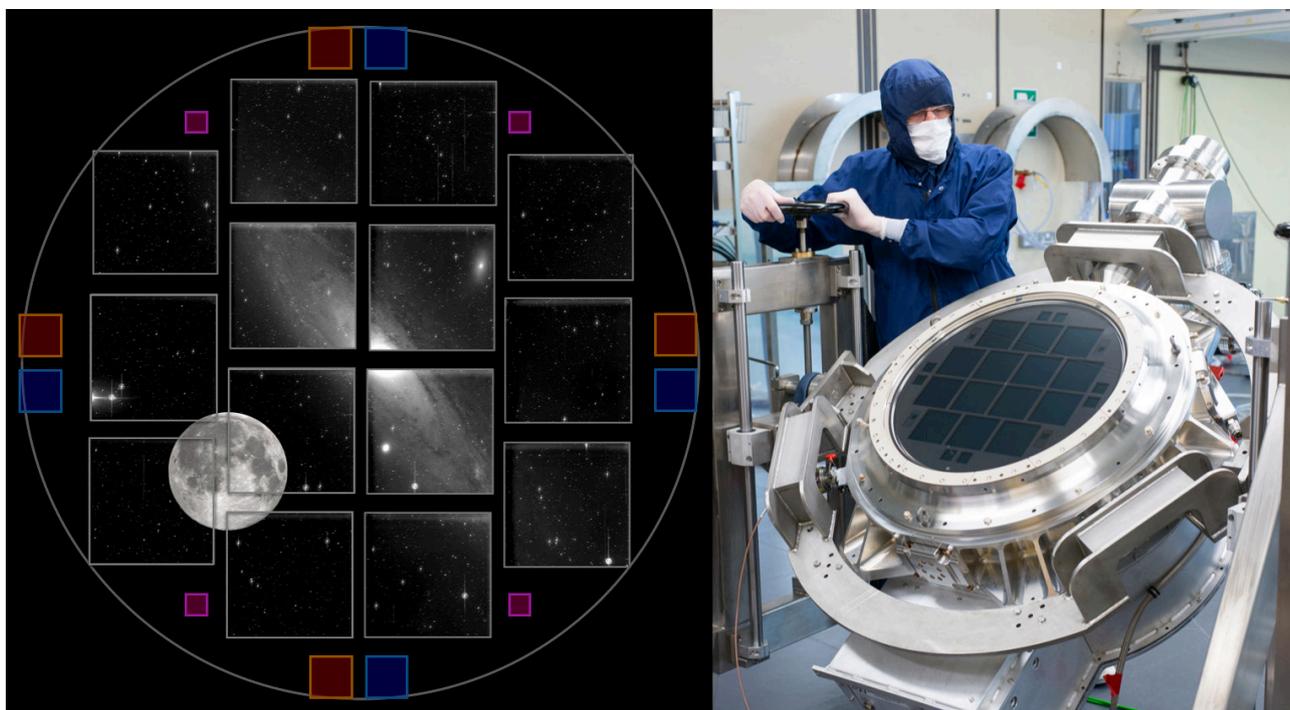
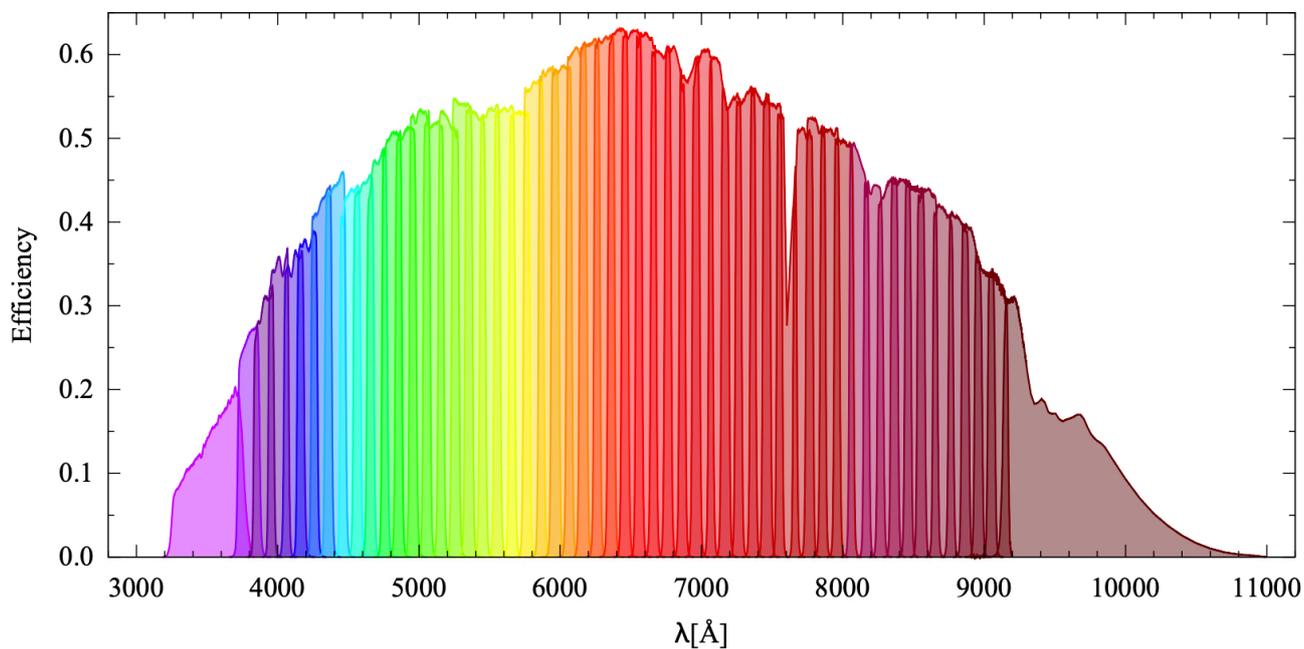


Figura 2. Derecha: cámara criogénica de JPCam en las instalaciones de Teledyne-e2v durante la fase de verificación en fábrica. Izquierda: Imagen de M31 tomada con JPCam y JST250 durante las primeras pruebas de observación. Esta imagen muestra la proyección del campo de visión observado por JST250 (círculo gris). La imagen a escala de la Luna se ha añadido con el objetivo de ilustrar el gran campo de visión del tándem JST250-JPCam.

Figura 3. Representación de la eficiencia del conjunto de filtros J-PAS a lo largo del espectro óptico.



ruido de lectura de solo 5.5 electrones (rms). JPCam representa tecnológicamente el *estado del arte* y hasta la fecha se constituye como la segunda cámara más grande del mundo en número de píxeles.

Garantizar una calidad de imagen óptima en todo el plano focal es siempre un reto, y especialmente en sistemas de gran campo de visión. En este sentido, el espejo secundario M2 del JST250 y el plano focal de JPCam están controlados activamente con dos actuadores del tipo hexápodo, lo que permite realizar correcciones finas en la posición del espejo secundario y del instrumento para compensar cambios de temperatura y/o flexiones mecánicas para diferentes orientaciones del telescopio, manteniendo la óptica permanentemente alineada en cualquier condición de operación.

El sistema de control de calidad de imagen que controla ambos hexápodos se basa en una técnica de detección y análisis de las aberraciones ópticas que afectan al sistema y, a partir de estas, calcula la posición óptima de ambos hexápodos para unas condiciones de temperatura y orientación del telescopio dadas. Para la medida de aberraciones en tiempo real JPCam incluye un conjunto de 8 detectores en la periferia de su plano focal, el cual se completa con 4 detectores adicionales dedicados a tareas de autoguiado. En la figura 2 se muestra el plano focal de JPCam en detalle (derecha), así como su proyección en cielo (izquierda).

En su conjunto, el sistema JST250-JPCam ha sido diseñado y optimizado para realizar grandes cartografiados fotométricos de manera eficiente, aportando un gran campo de visión, calidad de imagen y capacidad multifiltro.

SISTEMA DE FILTROS J-PAS

Una de las claves del proyecto J-PAS es su sistema de filtros sin precedentes (imagen 3), un conjunto de 54 filtros ópticos contiguos de banda estrecha (cada uno con un ancho de 145 Å), y con una separación de 100 Å de distancia entre sí, además de dos filtros de banda ancha en los extremos azul y rojo del rango óptico que proporcionan efectivamente un espectro de baja resolución ($R \sim 60$) para cada objeto observado. El sistema de filtros se ha diseñado y optimizado para medir desplazamientos al rojo fotométricos (foto-z) con un error relativo del 0.3%.

El instrumento JPCam se ha diseñado para admitir 5 bandejas de filtros, con 14 filtros cada una. Esto permite instalar simultáneamente todos los filtros de J-PAS en el instrumento, eliminando así la necesidad de cambiar los filtros de una noche a otra.

PRIMERA CIENCIA CON J-PAS

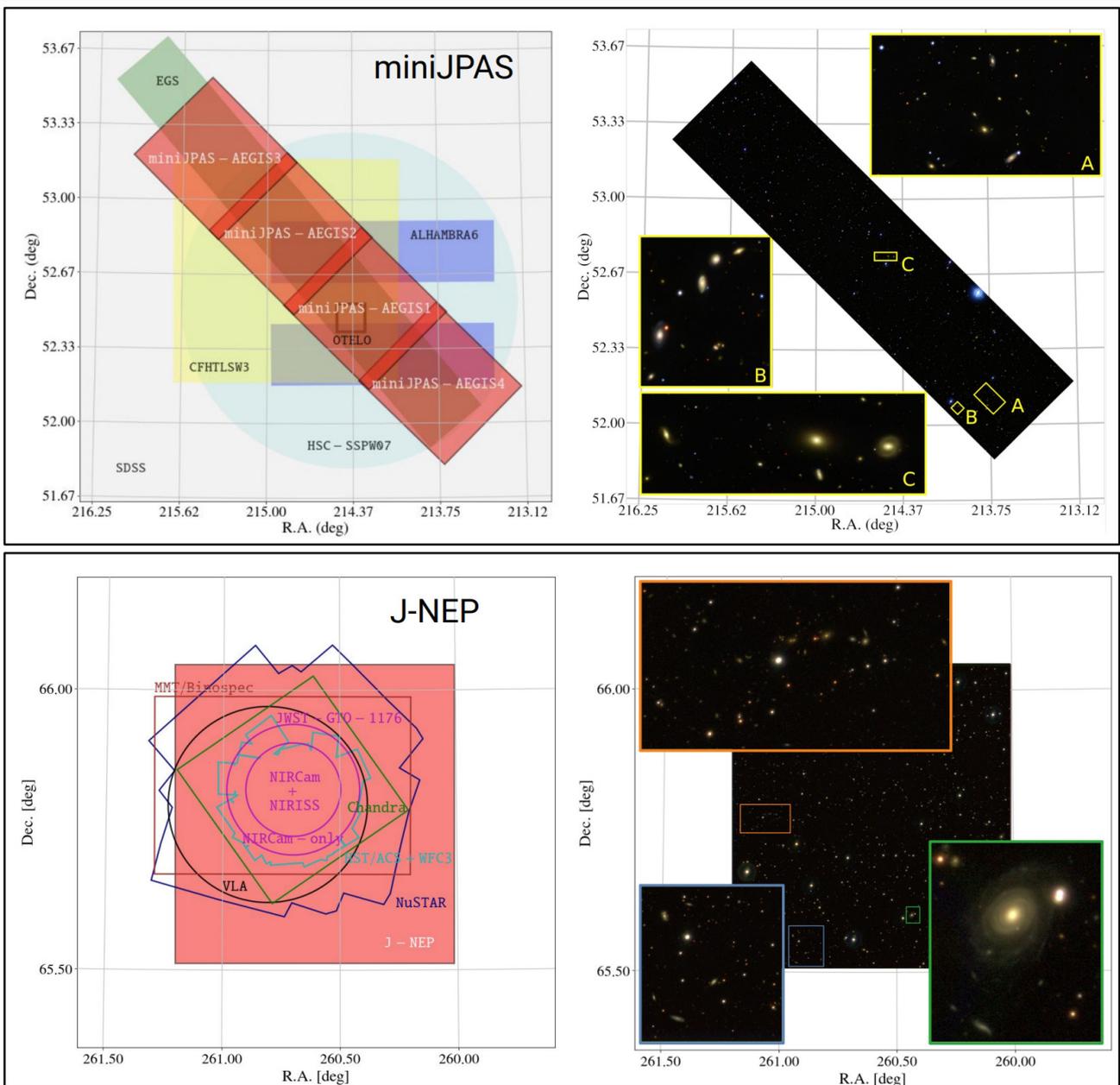
Mientras desde el OAJ se realizaba el comisionado de JPCam, la colaboración J-PAS se centró en la explotación científica de los datos de miniJPAS (Bonoli et al. 2021) y de J-NEP (Hernán-Caballero et al. 2023), adquiridos con la cámara *Pathfinder*, precursora de JPCam. En la figura 4 se muestran los campos miniJPAS y J-NEP, así como los campos de otros proyectos que cubren regiones del cielo que se solapan. En particular, parte del campo de J-NEP está siendo actualmente observado por JWST y cubre un área de 0.25 grados cuadrados sobre el cielo para la que disponemos de una amplia cobertura de observaciones multi-frecuencia.

En efecto, los datos de miniJPAS y J-NEP ya han dado lugar a una veintena de publicaciones en las cuales se demuestran, cualitativa y cuantitativamente, las capacidades de J-PAS en un amplio rango de problemas astrofísicos. Quizás el resultado más significativo sea la capacidad demostrada de medir desplazamientos al rojo (foto-zs) con una precisión del 0.3%, o incluso mejor, para un 50% de las galaxias catalogadas (Hernán-Caballero et al. 2021, 2023 - ver figura 5 para el caso de J-NEP). Este requerimiento *fundacional* del cartografiado permite caracterizar la estructura a gran escala con alta precisión para decenas de millones de galaxias y cuásares, lo que se traduce, más allá del estudio de las oscilaciones acústicas bariónicas (BAOs), en la posibilidad de construir catálogos de cúmulos y grupos de galaxias con una masa mínima del orden de $\sim 10^{13}$ masas solares (con una densidad de unos 100 grupos/cúmulos por grado cuadrado, Maturi et al. 2023 - ver figura 6, izquierda), así como en la identificación de una gran población (~ 150 por grado cuadrado) de cuásares con foto-zs de alta precisión para $z \in [1.5, 3.5]$ (Queiroz et al. 2023, Rodrigues et al. 2023, Martínez-Solaesche et al. 2023, Pérez-Ràfols et al. 2023). Ambos catálogos se verán complementados por los datos de las colaboraciones eROSI-TA/DE (rayos X) y WEAVE-QSO (espectroscopía en el óptico para el estudio del bosque Lyman- α , Pieri et al. 2016), otorgándoles un valor de legado muy significativo. Se destaca también la posibilidad de

trabajar en la emisión difusa asociada tanto a galaxias y a cúmulos como a cuásares. En la figura 6 (derecha) se muestran imágenes de miniJPAS en el filtro J0520 centradas en dos cuásares a $z \sim 3.2$. Para este desplazamiento al rojo, el filtro J0520 correspon-

de a la longitud de onda de la emisión Lyman- α . Se puede apreciar la emisión difusa de Lyman- α y la presencia de dos núcleos (no presentes en otros filtros), probablemente indicadores de enormes regiones extendidas con emisión Lyman- α (Rahna et al. 2022)

Figura 4. Izquierda: coordenadas de los campos de miniJPAS (arriba) y J-NEP (abajo). Derecha: imágenes de los campos y zoom alrededor de cúmulos de galaxias y galaxias cercanas.



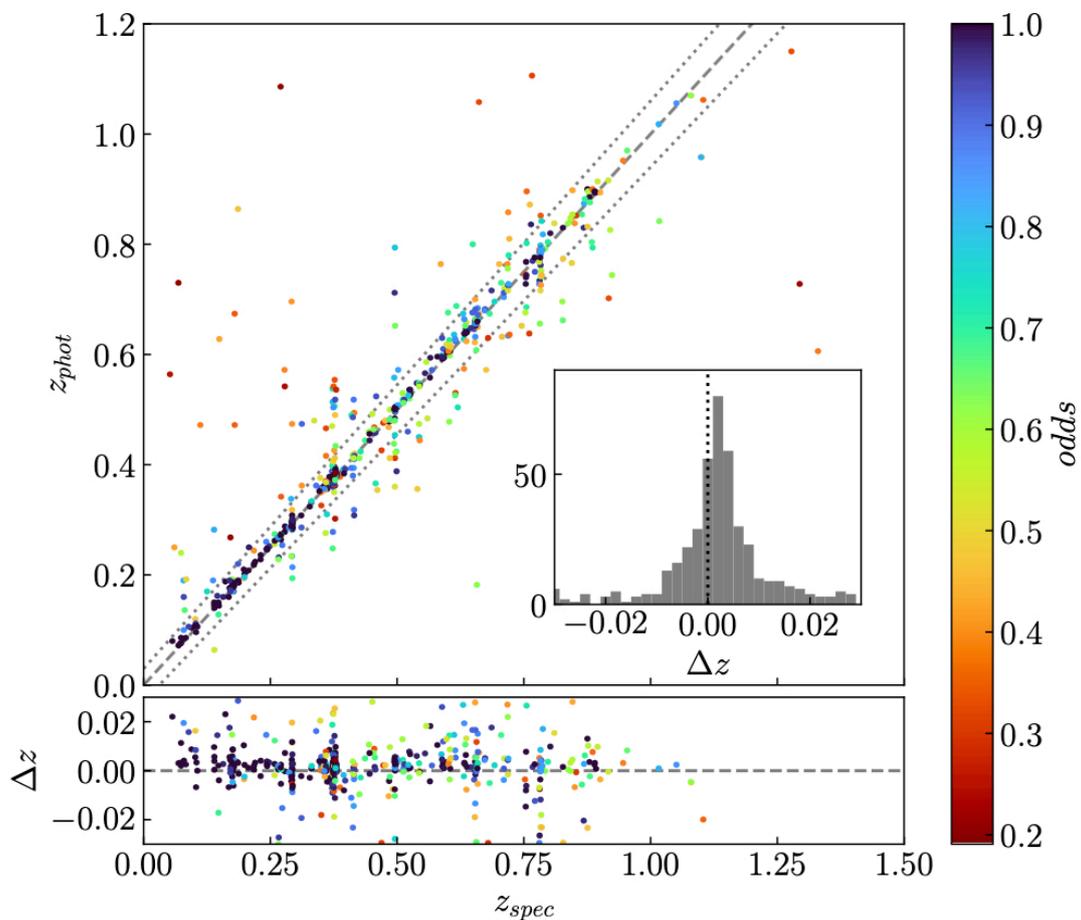


Figura 5. Foto-zs obtenidos en el campo de J-NEP comparados a desplazamientos al rojo espectroscópicos. Se puede apreciar el aumento de precisión al aumentar del parámetro de fidelidad "odds" (Hernán-Caballero et al. 2023).

Con varias decenas de miles de galaxias catalogadas en los 54+3 filtros, los estudios sobre formación y evolución de galaxias han confirmado el potencial de J-PAS en este ámbito. Se ha avanzado en la comprensión y el descubrimiento de nuevas galaxias con líneas de emisión (Martínez-Solaache et al. 2022, Iglesias-Páramo et al. 2022), en el estudio de la evolución de las poblaciones estelares desde $z = 1$ (González Delgado et al. 2021), en la influencia del entorno (Rodríguez-Martín et al. 2022, González Delgado et al. 2022), así como en el impacto de los núcleos activos en la evolución galáctica (López et al. 2023). Se ha estudiado también cómo los filtros estrechos de J-PAS se pueden utilizar incluso para estimaciones estadísticas de las masas de agujeros negros supermasivos (Chaves-Montero et al. 2022).

Todos estos resultados se han obtenido de la observación de apenas un grado cuadrado, y es por tanto de esperar un número relevante de estudios en este ámbito a medida que el cartografiado avance y se estudien regiones dispares en el universo.

El cartografiado J-PAS ofrece también una oportunidad única para estudiar, de forma totalmente indiscriminada, los diferentes tipos de estrellas que conforman nuestra galaxia. Los datos existentes ya han demostrado la sensibilidad del sistema de filtros del cartografiado J-PAS a pequeñas *muestras* presentes en los espectros estelares que le permiten determinar con precisión parámetros atmosféricos como la gravedad en superficie, la temperatura efectiva o la metalicidad (esta última con una precisión cercana

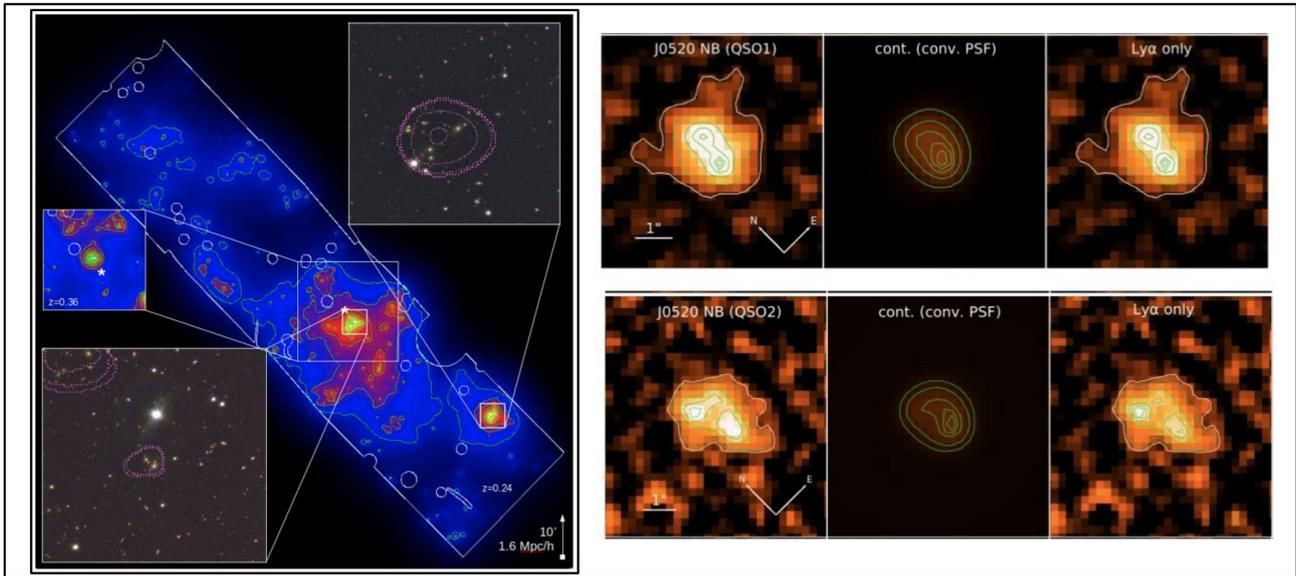


Figura 6. Izquierda: Ilustración de la detección de grupos y cúmulos de galaxias por el software AMICO a $z\sim 0.24$. Las densidades se indican con colores y trazan la presencia de estructuras. Las dos imágenes ampliadas de los datos de miniJPAS están centradas en las detecciones más significativas a este desplazamiento al rojo (Maturi et al. 2023)- Derecha: Emisión en el filtro J0520 centrada en dos cuásares a $z\sim 3.2$ (paneles de la izquierda), convolución de la imagen de Lyman- α con el flujo del continuo (paneles centrales), imágenes de J0520 con el continuo sustraído (paneles de la derecha; Rhana et al. 2022).

a 0.1 dex, Yuan et al. 2023, figura 7, izquierda). De esta forma, J-PAS abre la posibilidad de *aislar*, de una muestra total de millones de estrellas, aquellos pocos objetos con muy baja metalicidad ($[Fe/H] < -3.5$) que permiten estudiar el origen de la Vía Láctea. Asimismo, el mismo sistema de filtros de J-PAS también permite caracterizar, con gran precisión y para un amplio rango de temperatura efectiva, la presencia de calcio en enanas blancas, aparte de clasificarlas como dominadas por hidrógeno o por helio (López-Sanjuan et al. 2022, figura 7, derecha). Se da la circunstancia que los datos de J-PAS complementan óptimamente la información astrométrica y fotométrica proporcionada por el satélite *Gaia*, ya que J-PAS es unas dos magnitudes más profundo con una resolución espectral similar.

J-PAS COMO PROYECTO DE LEGADO

Los datos obtenidos no solo serán útiles para los objetivos específicos del proyecto J-PAS, sino que también dejarán un impacto duradero en la investigación astronómica en general. J-PAS proporcionará foto-espectros de resolución $R\sim 60$ para todos y cada uno de los objetos detectados, y permitirá

medir foto-zs con un error menor de 0.3% para unos 100 millones de galaxias y cuásares. El conjunto de datos producido tendrá por tanto un evidente valor de legado para la comunidad científica internacional, permitiendo abarcar una amplia variedad de estudios en diversas ramas de la astrofísica.

El manifiesto carácter transversal de J-PAS, demostrado con los datos de miniJPAS y J-NEP, ha motivado un notable número de acuerdos con otras colaboraciones internacionales, como el *Memorandum of Understanding (MoU)* que se ha suscrito con la colaboración eROSITA/DE para el estudio conjunto de la población de cúmulos y grupos de galaxias y de núcleos activos. Para estos últimos los foto-zs de J-PAS añaden un ingrediente crítico para analizar la evolución cosmológica de estas fuentes. Al mismo tiempo, la estimación del flujo en rayos X por eROSITA/DE de los grupos y cúmulos J-PAS derivará en una estimación independiente de su masa, muy valiosa en el contexto de la interpretación cosmológica de este catálogo de superestructuras. Por otro lado, con WEAVE-QSO la colaboración J-PAS tiene el compromiso de proporcionar catálogos de cuásares hasta $r\sim 22.5-23$ para

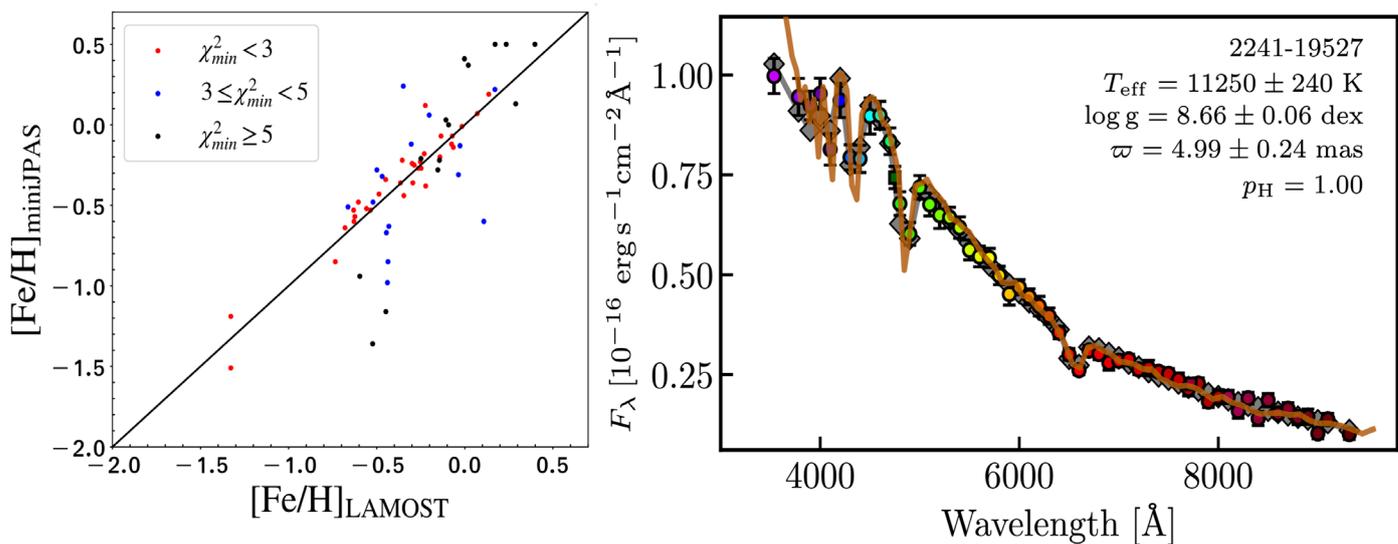


Figura 7. Izquierda: comparación entre las metallicidades de una muestra de estrellas dentro del campo de miniJPAS derivadas con los datos de miniJPAS y con los datos espectroscópicos de LAMOST - Derecha: ejemplo del foto-espectro de una enana blanca observada en miniJPAS (puntos en color) comparado con el espectro de SDSS (línea marrón continua) y el mejor ajuste teórico (línea gris continua). Los parámetros atmosféricos derivados de la fotometría de miniJPAS se presentan en el panel, incluyendo su clasificación como enana blanca con atmósfera de hidrógeno.

su posterior seguimiento espectroscópico, añadiendo así el estudio de la física del bosque de Lyman- α a la de la propia muestra de cuásares de J-PAS, que ya de por sí será una de las más profundas y extensas. De la misma forma, J-PAS también trabaja conjuntamente con JWST en la variabilidad en el óptico de fuentes en el campo J-NEP. Finalmente, es de señalar el *MoU* existente entre el CEFCA y el consorcio *Euclid*, consistente en el apoyo con observaciones de JPCam a dicha misión espacial de la ESA. En los próximos años seguiremos encontrando nichos de interés común y colaboración con otros grandes cartografiados en el panorama internacional.

PRIMERAS OBSERVACIONES DE J-PAS

Las primeras observaciones de J-PAS han comenzado después de un extenso proceso de verificación y optimización de JPCam en el JST250, realizado por el personal técnico y de investigación del CEFCA. La última fase del comisionado, concluida recientemente, confirmó que el sistema JPCam-JST250 cumple con todos los requisitos científico-técnicos previstos inicialmente, destacando su excelente calidad de imagen en todo el campo de visión.

Hasta el momento, se han completado los primeros 30 grados cuadrados (equivalentes a un área de 120 lunas llenas) con los 54+3 filtros de J-PAS, proporcionando la primera información sobre más de un millón de estrellas y galaxias. En la figura 8 se muestran, a título de ejemplo, algunos de los primeros datos J-PAS obtenidos con JST250-JPCam.

La gran cantidad de datos que genera J-PAS requiere de una infraestructura que permita la gestión, análisis y almacenamiento de esta información. Con este fin, CEFCA ha desplegado la Unidad de Procesado y Archivo de Datos (UPAD), un centro de datos diseñado para recibir, procesar, archivar y ofrecer a la comunidad científica internacional los datos de los telescopios del OAJ reducidos y calibrados. El centro de datos tiene una capacidad de almacenamiento total de unos 5.4PB y capacidad de cómputo gracias a sus más de 17 nodos con más de 544 cores usables en total. En la UPAD las imágenes son procesadas empleando una *pipeline* específicamente implementada en CEFCA para los proyectos del OAJ y, en particular para J-PAS, que está en continuo desarrollo y mejora desde hace

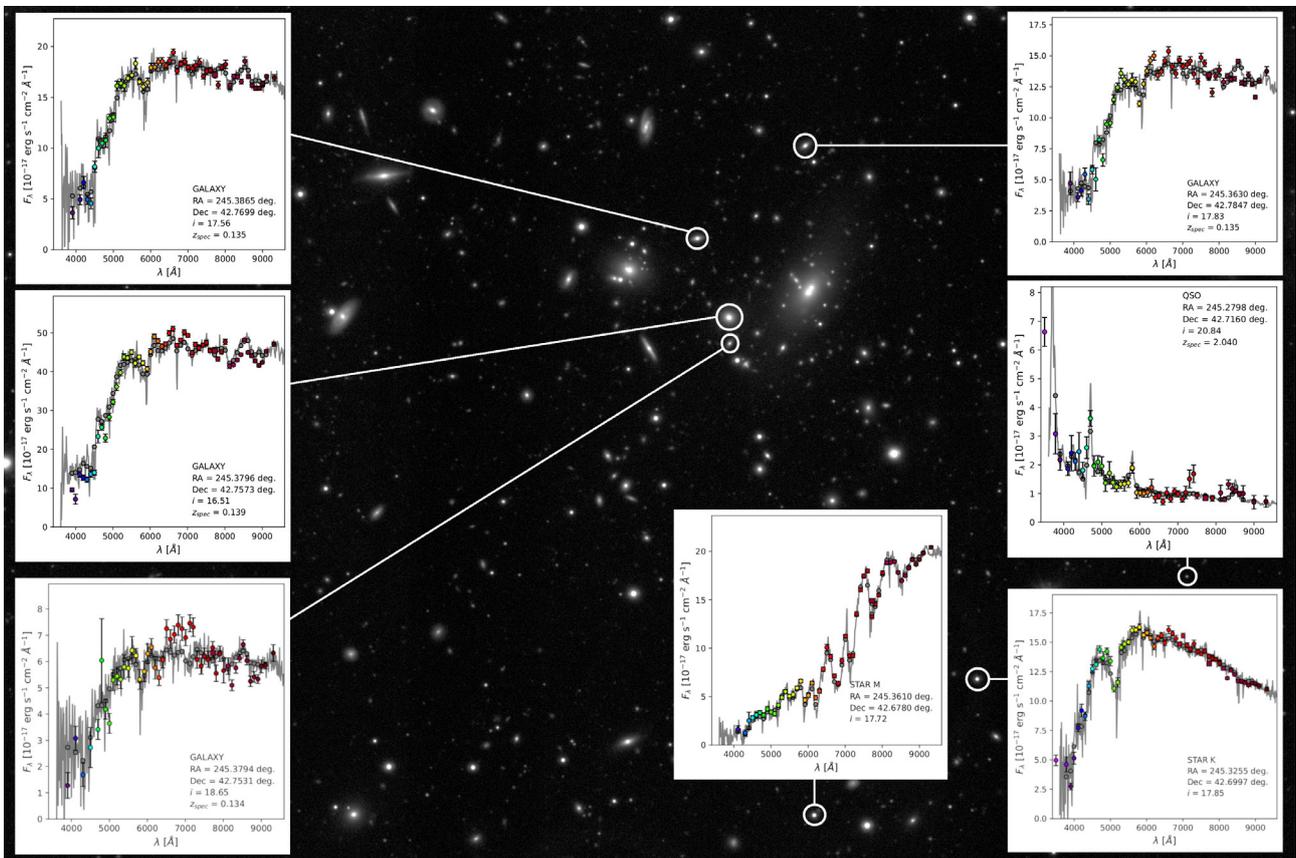
ya más de 10 años. Para la distribución de los productos de J-PAS (imágenes, catálogos, catálogos de valor añadido, etc.) se han desarrollado portales web específicos que permiten un acceso rápido y ágil a los mismos (<https://archive.cefca.es/catalogues>), ofreciendo además diferentes servicios del Observatorio Virtual; todo ello aplicando los principios FAIR (*Findable Accessible, Interoperable and Reusable*, Civera 2021).

PERSPECTIVAS FUTURAS

Durante la próxima década JPCam seguirá cartografiando el cielo visible desde Javalambre, evitando las zonas de alta extinción de la Vía Láctea. El

objetivo final es cubrir unos 8500 grados cuadrados, proporcionando foto-espectros con resolución $R \sim 60$ para cientos de millones de objetos entre estrellas, galaxias y cuásares. Tanto el área como la estrategia multi-filtro de observación es única en el panorama actual, dando lugar a un conjunto de datos con un alto valor de legado para la comunidad internacional, que seguro trascenderán los objetivos científicos presentes y futuros de la colaboración J-PAS. Comienza pues una nueva fase de intensa actividad en Javalambre, cuya ventana multicolor al universo proporcionará nueva ciencia y nuevos resultados, que con gusto compartiremos en próximos boletines de la SEA.

Figura 8. Imagen comparativa de los primeros datos de J-PAS con espectros públicos disponibles. La imagen de fondo es una pequeña región de una de las exposiciones de J-PAS. Las gráficas presentan los foto-espectros (puntos en color) en comparación con los espectros de la colaboración Sloan SDSS (líneas en gris tenue), para cuatro galaxias, un cuásar y dos estrellas.





Los autores del artículo. De izquierda a derecha: Antonio Marín-Franch, Carlos López Sanjuan, José M. Vílchez, Silvia Bonoli y Carlos Hernández Monteagudo.

REFERENCIAS

- Maturi, M., et al.; The miniJPAS survey. Cluster and galaxy group detections with AMICO; 2023; A&A 678; A145
- Pérez-Ràfols, I., et al.; The miniJPAS survey quasar selection. IV. Classification and redshift estimation with SQUEzE; 2023; A&A 678; A144
- Martínez-Solaache, G., et al.; The miniJPAS survey quasar selection. III. Classification with artificial neural networks and hybridisation; 2023; A&A 673; A103
- Rodrigues, N. V. N., et al.; The miniJPAS survey quasar selection - II. Machine learning classification with photometric measurements and uncertainties; 2023; MNRAS 520; 3494-3509
- Queiroz, C., et al.; The miniJPAS survey quasar selection - I. Mock catalogues for classification; 2023; MNRAS 520; 3476-3493
- López, I. E., et al.; The miniJPAS survey: AGN and host galaxy coevolution of X-ray-selected sources; 2023; A&A 672; A137
- Hernán-Caballero, A., et al.; J-NEP: 60-band photometry and photometric redshifts for the James Webb Space Telescope North Ecliptic Pole Time-Domain Field; 2023; A&A 671; A71
- Yuan, H.-B., et al.; The miniJPAS survey: stellar atmospheric parameters from 56 optical filters; 2023; MNRAS 518; 2018-2033
- Rahna, P. T., et al.; The miniJPAS Survey: Detection of the double-core Ly α morphology for two high-redshift QSOs; 2022; A&A 668; A148
- Rodríguez-Martín, J. E., et al.; The miniJPAS survey. Galaxy populations in the most massive cluster in miniJPAS: mJPC2470-1771; 2022; A&A 666; A160
- González Delgado, R. M., et al.; The miniJPAS survey. The role of group environment in quenching star formation; 2022; A&A 666; A84
- López-Sanjuan, C., et al.; The miniJPAS survey: White dwarf science with 56 optical filters; 2022; A&A 665; A151
- Iglesias-Páramo, J., et al.; The miniJPAS survey: A search for extreme emission-line galaxies; 2022; A&A 665; A95
- Martínez-Solaache, G., et al.; The miniJPAS survey: Identification and characterization of the emission line galaxies down to $z < 0.35$ in the AEGIS field; 2022; A&A 661; A99
- Chaves-Montero, J., et al.; Black hole virial masses from single-epoch photometry. The miniJPAS test case; 2022; A&A 660; A95
- Hernán-Caballero, A., et al.; The miniJPAS survey: Photometric redshift catalogue; 2021; A&A 654; A101
- Bonoli, S., et al.; The miniJPAS survey: A preview of the Universe in 56 colors; 2021; A&A 653; A31
- González Delgado, R. M., et al.; The miniJPAS survey. Identification and characterization of galaxy populations with the J-PAS photometric system; 2021; A&A 649; A79
- Pieri, M., et al.; WEAVE-QSO: A Massive Intergalactic Medium Survey for the William Herschel Telescope, 2016; SF2A-2016, Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics.
- Merloni, A., et al.; eROSITA Science Book: Mapping the Structure of the Energetic Universe, 2012; arXiv e-prints, arXiv:1209.3114
- Civera, T., CEFCA Catalogues Portal towards FAIR principles. Proceedings ADASS XXXI (2021). <https://arxiv.org/abs/2208.05272>

El 29 de Junio de 2023 marca un hito en la historia de la astronomía gravitacional. La colaboración NANOGrav, junto con otras colaboraciones internacionales, anunciaron ese día el hallazgo en sus observaciones de la primera evidencia de la existencia de un fondo de ondas gravitacionales. Este acontecimiento marca también el principio de la astronomía gravitacional a bajas frecuencias (del orden de nano-Hercios). Junto con las observaciones de la colaboración LIGO/Virgo/Kagra este hecho señala también el nacimiento de la astronomía gravitacional multi-frecuencia.

A continuación describiremos brevemente las ideas principales en las que se basan estas observaciones así como sus resultados y sus posibles implicaciones para la astrofísica y la cosmología.



José J. Blanco-Pillado

Universidad del País Vasco UPV/EHU
josejuan.blanco@ehu.es

Xavier Siemens

Oregon State University
xavier.siemens@oregonstate.edu

LAS ONDAS GRAVITACIONALES COMO UNA NUEVA VENTANA AL UNIVERSO

Hace más de un siglo Einstein postuló la existencia de ondas del tejido mismo del espacio-tiempo. Sin embargo, la detección directa de las primeras ondas gravitacionales no se produjo hasta el año 2015 cuando la colaboración LIGO/Virgo capturó la señal emitida en forma de ondas gravitacionales por el choque de dos agujeros negros de aproximadamente 30 masas solares cada uno.

Desde esa primera detección la colaboración LIGO/Virgo ha continuado observando eventos de este tipo de forma rutinaria hasta el punto de que hoy en día el número total de sucesos registrados similares a aquel primero se acerca al centenar. Este tipo de observaciones realizadas en los interferómetros terrestres nos proporciona una cantidad de información muy valiosa sobre todos los objetos o sucesos en el universo que emiten ondas gravitacionales a una frecuencia del orden de 100 Hercios.

Por otro lado, la historia de la astronomía está plagada de ejemplos donde la observación en un nuevo rango de frecuencias electromagnéticas nos ha permitido descubrir eventos y procesos físicos nuevos. Por ejemplo, observaciones del cielo a ondas de radio muestran un universo muy distinto y complementario al universo que vemos con rayos X, ondas electromagnéticas once órdenes de magnitud mayores en frecuencia. Es por tanto imprescindible ampliar el espectro de frecuencias a las que tenemos acceso directo en el ámbito de ondas gravitacionales también.

Sin embargo, es claro que el rango de frecuencias es tan vasto que los métodos usados para detectar un tipo de ondas de alta frecuencia como las de LIGO/Virgo no son aplicables a otras zonas del espectro de ondas gravitacionales. Esta idea ha dado lugar a distintos métodos para la exploración del espectro de ondas gravitacionales a distintas frecuencias. Desde los interferómetros terrestres como LIGO/Virgo/Kagra hasta los métodos de detección de polarización asociada a la presencia de ondas gravitacionales en el fondo cósmico de microondas a frecuencias extremadamente bajas, el espectro de ondas gravitacionales tiene varias bandas de frecuencia donde los dispositivos y estrategias son muy diferentes.

ESCUCHANDO EL MURMULLO DEL COSMOS

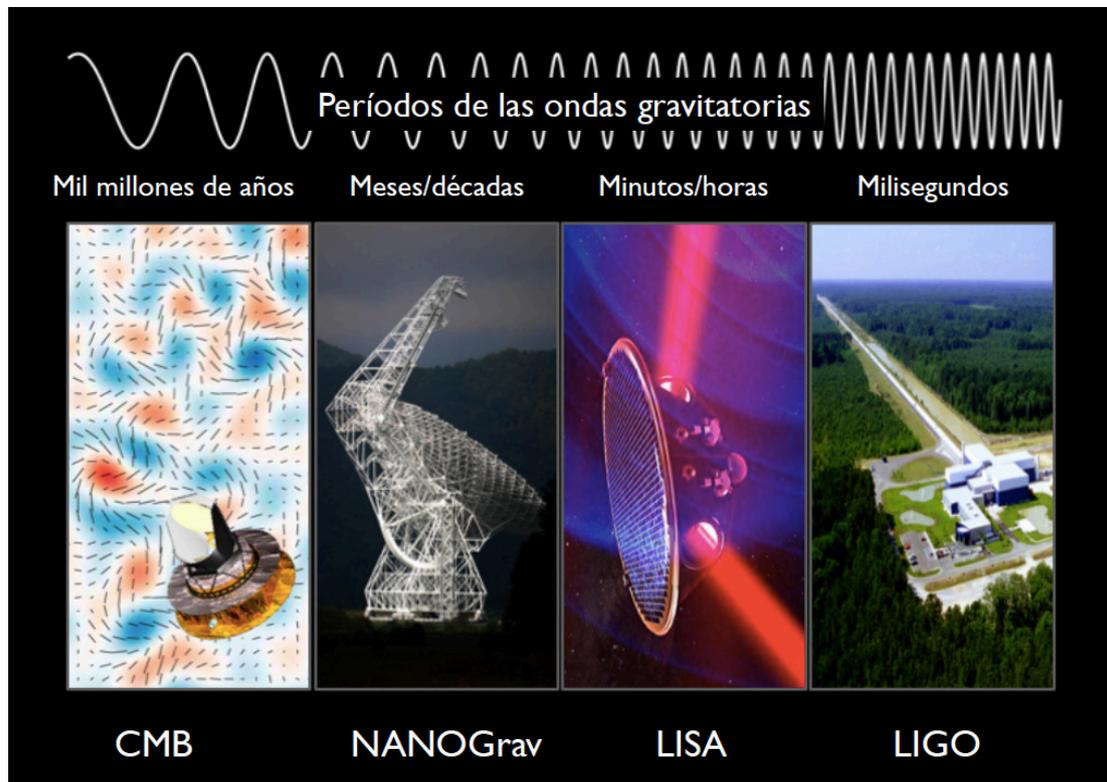


Figura 1. El espectro de ondas gravitacionales abarca muchos órdenes de magnitud en frecuencia, desde ondas gravitacionales que varían en tiempos de milisegundos, como las que detecta LIGO, hasta ondas que duran miles de millones de años como las que se están buscando en el fondo de microondas. [Shami Chatterjee/NANOGrav].

En este artículo nos concentraremos en la detección de ondas gravitacionales cuyos periodos van desde un año hasta una década. Esta técnica esta basada en el uso de una red de púlsares que, observados con los radiotelescopios más sensibles a los que tenemos acceso, nos permiten construir un detector de ondas gravitacionales a escala galáctica. A continuación, detallaremos brevemente el método usado en la detección de ondas gravitacionales haciendo uso de estos pulsares. nos permiten tener un detector de ondas gravitacionales a escala galáctica. A continuación, detallaremos brevemente el método usado en la detección de ondas gravitacionales haciendo uso de estos pulsares.

USANDO PÚLSARES COMO DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONALES

Los púlsares son estrellas de neutrones que se forman después de que su estrella progenitora acabe

su periodo vital mediante una explosión de tipo supernova. Una de las características principales de estos púlsares es la presencia de un haz de ondas electromagnéticas que emana de su polo magnético. La rápida rotación de esta estrella de neutrones produce un fenómeno similar al de un faro en el que el haz barre, de forma periódica, zonas del espacio produciendo en esas direcciones la presencia de pulsos de energía electromagnética. Algunos de estos púlsares en nuestra galaxia dirigen de forma periódica su haz de ondas electromagnéticas hacia la Tierra y se pueden detectar usando radio telescopios. El periodo de alguno de estos pulsares es extremadamente estable, lo que confiere a estos objetos astrofísicos la distinción de ser los relojes naturales más precisos. Es precisamente esta característica natural de los pulsares como relojes cósmicos super-precisos lo que los hace candidatos perfectos para formar parte de un detector de ondas gravitacionales.

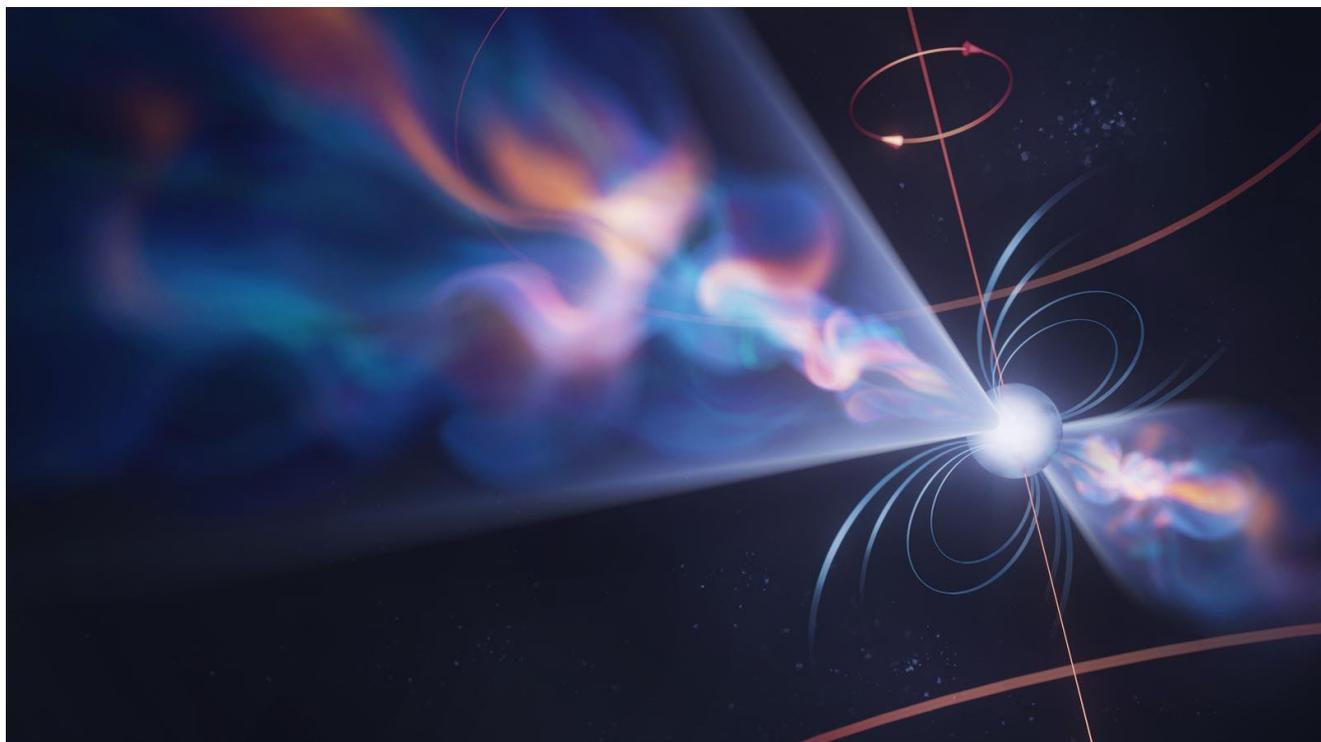


Figura 2. Representación artística de un púlsar. Crédito NANOGrav [3].

Cuando una onda gravitatoria atraviesa el espacio que media entre nosotros y el pulsar, distorsiona el espacio-tiempo. Una manera de entender este efecto radica en considerar que la onda gravitacional altera, a su paso, la distancia efectiva que recorren los pulsos desde el pulsar hasta nosotros. Esto da lugar a una modificación en el instante de llegada del pulso a la Tierra, ya sea anticipándolo o retrasándolo de manera leve. La observación extremadamente precisa de la llegada de estos pulsos es por tanto un método que nos permite, en principio, inferir la existencia de ondas gravitatorias.

No obstante, la detección de este tipo de señales es mucho más complicada debido a la presencia de numerosos fenómenos que pueden enmascarar o simular los efectos de las ondas gravitacionales. Es por esto por lo que es necesario encontrar un método que nos permita eliminar en la medida de lo posible estos otros efectos, así como identificar la señal puramente relacionada con las ondas gravitacionales.

Para poder llevar esto a cabo se necesita en primer lugar entender el tipo de fenómenos que pueden inducir algún tipo de desviación temporal en la llegada de los pulsos a la Tierra. Esto requiere un estudio detallado de las características específicas de los pulsares (sus propiedades intrínsecas, periodo de rotación, posible órbita del pulsar, etc ...), así como de los posibles efectos debidos al recorrido del pulso por el espacio interestelar hasta nosotros.

Una vez que estos factores han sido debidamente considerados, se puede establecer un modelo teórico que pronostica el tiempo de llegada de los pulsos. Cualquier discrepancia con respecto a este modelo se considera potencialmente una señal atribuible a las ondas gravitacionales.

Aún bajo esta consideración exhaustiva, persiste la posibilidad de que algún efecto sea malentendido o, más aún, que la existencia de dicho efecto sea desconocida. Por consiguiente, es necesario emplear

algún procedimiento que permita eliminar cualquier señal que no sea producida por ondas gravitacionales. Afortunadamente la teoría de la Relatividad de Einstein nos proporciona este método, siempre y cuando se usen de forma simultánea los datos obtenidos por un conjunto de púlsares. Es por esto por lo que este tipo de observaciones se ha dado en llamar "Pulsar Timing Array (PTA) Observations" ya que implica el uso de señales provenientes de un conjunto o "array" de púlsares.

El efecto distintivo de las ondas gravitacionales aparece cuando calculamos las correlaciones entre las variaciones en los tiempos de llegada de los pulsos de este conjunto de púlsares. De acuerdo con la teoría de la Relatividad de Einstein, un fondo de ondas gravitacionales, que se presume homogéneo e isótropo, deja su impronta característica en estas correlaciones.

Dicho efecto se concreta en un patrón de correlaciones que exhibe una dependencia en función del ángulo entre las posiciones de los púlsares en el cielo. Esta función angular es conocida como la "curva de Hellings-Downs", y su detección de manera concluyente representa uno de los principales

objetivos de todas las colaboraciones que trabajan en el ámbito de la detección de ondas gravitacionales a través de esta metodología.

LA COLABORACIÓN NANOGrav

NANOGrav, las siglas con las que se conoce la colaboración internacional denominada *North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves*, fue establecida en el año 2007 y desde su creación ha ido aumentando el número de sus miembros hasta los aproximadamente 200 miembros actuales pertenecientes a 70 instituciones. La mayoría de estas instituciones se encuentran en Norteamérica (Estados Unidos y Canadá) pero también cuenta con un pequeño número de centros de investigación en Europa. España participa en NANOGrav con la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) a través del grupo de *Early Universe Cosmology* en Bilbao (Spain) (<http://tp.lc.ehu.es/earlyuniverse/>).

A lo largo de un periodo que abarca más de 15 años, la colaboración NANOGrav ha llevado a cabo un meticulosa recopilación de datos relativos a los tiempos de llegada de las señales de los pulsos provenientes de un conjunto de púlsares en nuestra

Figura 3. Los radiotelescopios que utiliza NANOGrav incluyen el Green Bank Telescope, de 100 metros, el Observatorio de Arecibo cuyo telescopio de 300 metros desgraciadamente colapsó en Diciembre del 2020 (NANOGrav utiliza en sus análisis datos de Arecibo hasta su colapso), el Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment (CHIME) en Canadá, y el Very Large Array (VLA) en Nuevo Mexico.



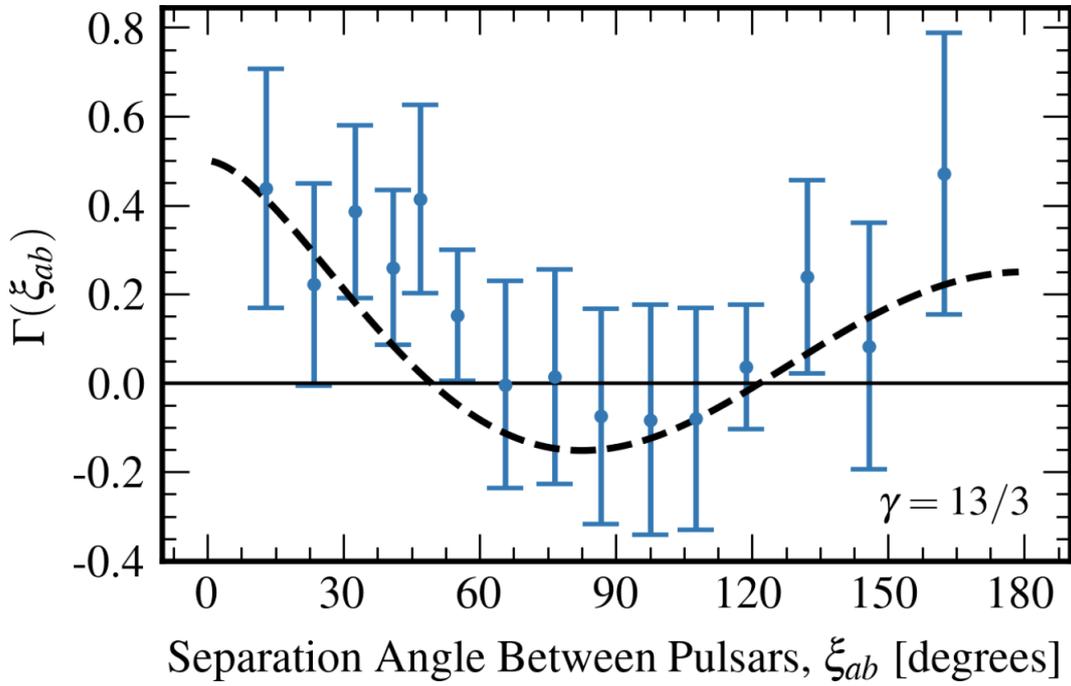
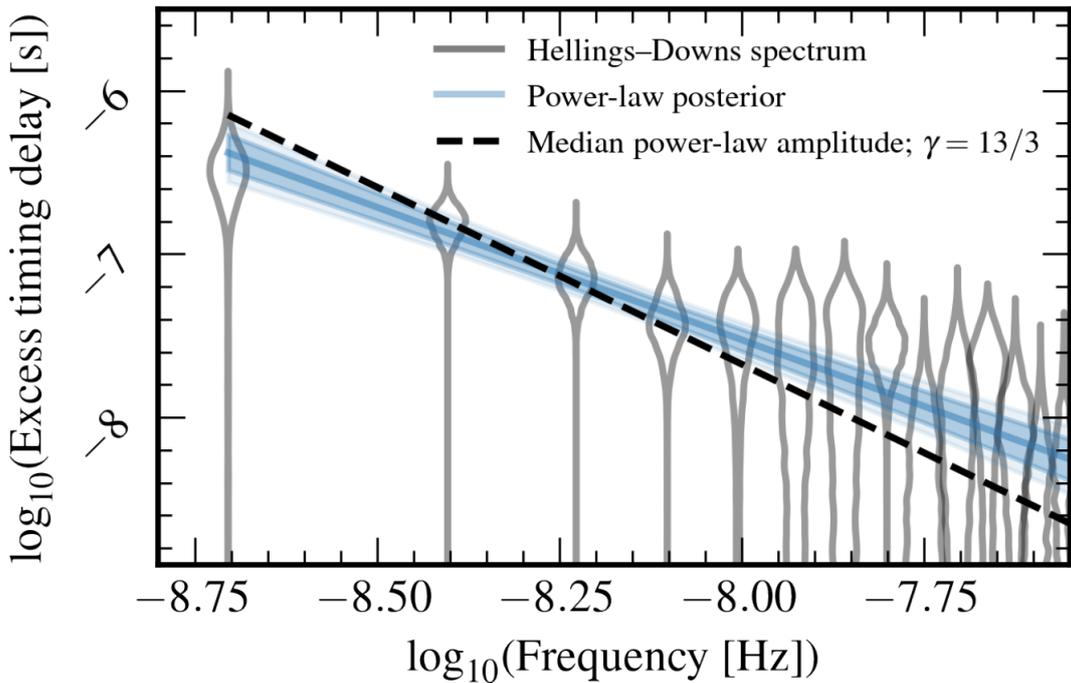


Figura 4. Correlaciones en las desviaciones en los tiempos de llegada de pulsos de púlsares como función de su separación angular. Los resultados de NANOGrav (en azul) comparados con la predicción de Hellings y Downs (en negro). (Para más información ver [1]).

Figura 5. El espectro de la señal encontrada por NANOGrav a distintas frecuencias (gris) se ajusta bien a una ley de potencias (azul, best fit), aunque no coincide exactamente con lo que esperamos de agujeros negros supermasivos (negro) que evolucionan puramente emitiendo ondas gravitacionales. (Para más información ver [1]).



galaxia. Para esta tarea la colaboración ha hecho uso de algunos de los radiotelescopios más grandes del mundo. En particular, los datos utilizados en el último análisis llevado a cabo por la colaboración (15 year data set) se han obtenido gracias al Radio Telescopio de Arecibo (Puerto Rico), y los telescopios de Green Bank (West Virginia, EEUU) y el Very Large Array en Nuevo Mexico (EEUU).

Durante estos años la colaboración ha ido incorporando nuevos pulsares al conjunto de objetos observados periódicamente hasta llegar al número de 67 pulsares en los que se basa el presente estudio. El procedimiento de adquisición de datos implica la observación de los tiempos de llegada de los pulsos con una frecuencia de muestreo típica de un mes. Esto nos permite poder decir algo sobre la potencia de la señal de ondas gravitacionales en periodos que van desde un mes (la cadencia de observación) hasta aproximadamente una década (el periodo total de observación).

El análisis de los datos obtenidos durante todos estos años parece indicar que la espera ha valido la pena! El 29 de Junio de este año, NANOGrav anunció públicamente la observación de la primera evidencia de la presencia de un fondo de ondas gravitacionales en el rango de nano-Hercios. Los resultados obtenidos por NANOGrav de las correlaciones entre los distintos pulsares observados demuestran una semejanza clara con la curva de Hellings y Downs (ver Figura 4). El análisis estadístico de los datos confirma esta evidencia visual. Los resultados se ajustan mejor a esta curva que a otra producida por algún otro tipo de efecto no relacionado con las ondas gravitacionales. Estudiando las propiedades de la señal de los pulsos a lo largo de los 15 años de observación, se puede extraer también información sobre la variación de la potencia del fondo de ondas gravitacionales a distintas frecuencias. El resultado indica la presencia de un espectro de ondas gravitacionales común a todos los pulsares.

El espectro obtenido por NANOGrav (15 year data set) se presenta en la Figura (5). En primera aproximación el espectro se ajusta bien a una ley de potencias caracterizada por una amplitud y un índice espectral. La información obtenida con el cálculo del espectro directamente de las observaciones es una

de las herramientas que nos permite distinguir entre los posibles modelos astrofísicos y cosmológicos que pueden dar lugar a esta señal.

EL ORIGEN DE ESTE FONDO DE ONDAS GRAVITACIONALES

Es importante recalcar una vez más que las observaciones realizadas por NANOGrav indican la presencia de una señal consistente con la existencia de un fondo de ondas gravitacionales. Es decir, a diferencia de lo que se detectó inicialmente en LIGO/Virgo, los resultados de NANOGrav no son atribuibles a una fuente puntual sino que todo indica que es el resultado de la combinación de un número grande de fuentes. Teniendo esto en cuenta la pregunta es clara. ¿Que tipo de objetos o eventos astrofísicos pueden dar lugar a estas fuentes y por lo tanto a este fondo de ondas gravitacionales?

Analizando los posibles objetos astrofísicos que pueden dar lugar a ondas gravitacionales en este rango de frecuencias, destaca un escenario en particular: una pareja de agujeros negros supermasivos de entre 100 y 1000 millones de masas solares orbitando uno en torno al otro. Este espectacular baile cósmico puede parecer a primera vista exótico sin embargo nuestro conocimiento actual de la evolución del universo nos lleva a pensar que este tipo de evento es, en cierto modo, bastante común.

A lo largo de la historia del universo la atracción gravitatoria hace que galaxias cercanas colisionen entre ellas. De hecho, es fácil encontrar ejemplos en los que este tipo de siniestro galáctico es capturado por alguna imagen de un catalogo de galaxias. Por otro lado, usando distintas observaciones astrofísicas hemos llegado también al convencimiento de que cada galaxia alberga en su interior a un agujero negro supermasivo.

Dadas estas circunstancias, es plausible suponer que muchas colisiones galácticas culminen con la formación de un sistema binario con dos agujeros negros supermasivos orbitando en órbitas cercanas a la circular.

Si estos agujeros negros no están acompañados por otra materia que afecte sus trayectorias, continuarán en su danza orbital durante millones de años, emitiendo ondas gravitacionales en el proceso. La

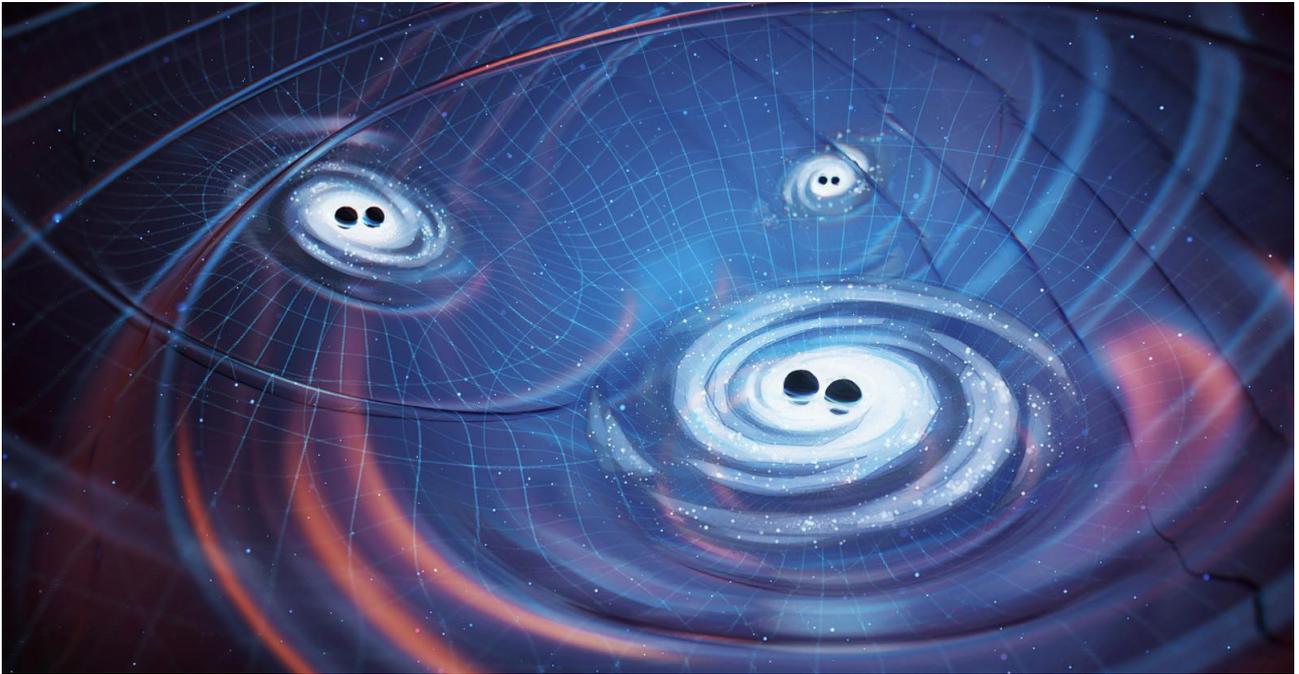
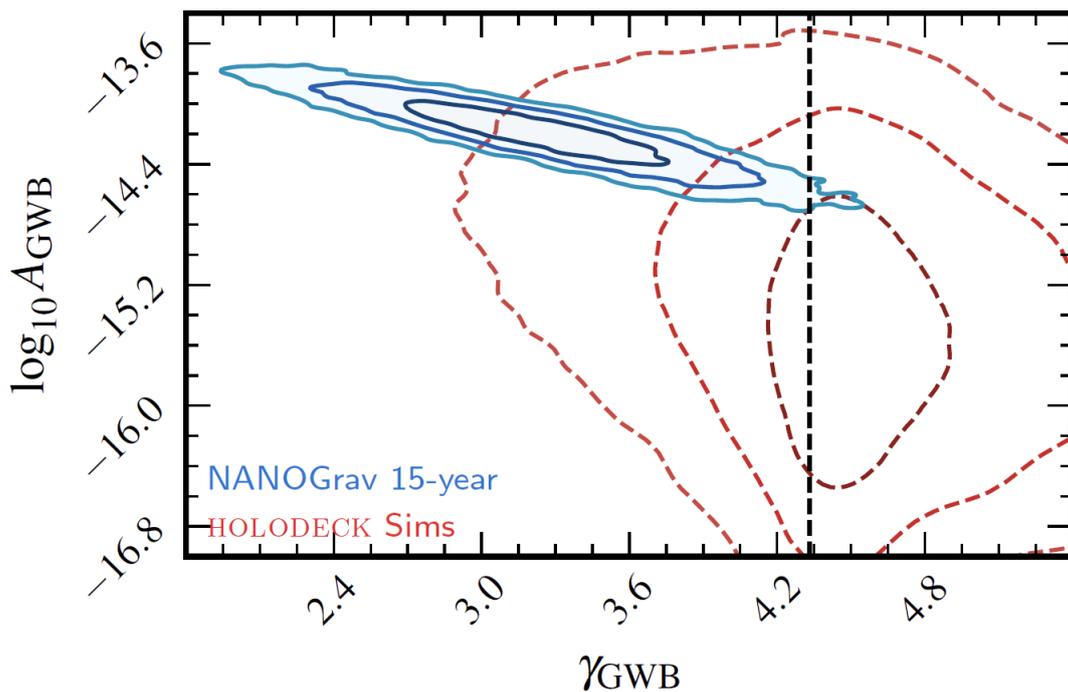


Figura 6. La colisión de múltiples agujeros negros supermasivos contribuye a un fondo de ondas gravitacionales en el rango de frecuencias de observación de los observatorios de PTAs. (Visión artística: NANOGrav website [3]).

Figura 7. Contours de la posterior probability para la amplitud (A_{GWB}) y el índice espectral γ_{GWB} para los datos obtenidos de NANOGrav (15 year data) (azul) comparados con los resultados obtenidos de la simulación de un conjunto de modelos de poblaciones de agujeros negros supermasivos (rojo, discontinuo). La línea vertical discontinua de $\gamma = 13/3$ describe el valor usualmente atribuido al caso de agujeros negros supermasivos en órbitas circulares.



acumulación de la emisión de ondas gravitacionales de todos estos eventos a lo largo de la historia del universo genera un fondo de ondas gravitacionales que debería ser detectable en el rango de nano-Hercios; el rango de frecuencias en el que se realizan las observaciones de NANOGrav. Todo esto nos lleva a concluir que este escenario es ciertamente una de las posibles fuentes de los datos obtenidos recientemente por NANOGrav.

A pesar de que esta fuente astrofísica de ondas gravitacionales es quizás la explicación más plausible de los resultados del NANOGrav existe la posibilidad de que ésta no sea la única contribución a este fondo de ondas gravitacionales. De hecho, los datos parecen indicar una cierta tensión entre el tipo de espectro que uno esperaría en estos modelos basados en agujeros negros supermasivos y el espectro que mejor se ajusta a los datos. Una manera de representar esta posible discrepancia se ilustra gráficamente en la Figura (6). En ella se muestra una comparación entre los parámetros que mejor ajustan los datos y aquellos obtenidos a partir de modelos de agujeros negros en órbitas circulares. Es importante de todas formas darse cuenta de la existencia de una considerable incertidumbre en las predicciones teóricas de modelos astrofísicos fundamentados en agujeros negros. Por lo tanto, podría ser prematuro considerar esta discrepancia como significativa.

Esta potencial discrepancia plantea la posibilidad de la existencia de otra contribución de origen distinto al fondo de ondas gravitacionales en este intervalo de frecuencias. Una de las ideas más interesantes a este respecto es la posibilidad de que fenómenos del universo temprano puedan contribuir a esta señal. Este tipo de fenómenos pueden estar asociados a la evolución misma de espacio-tiempo, como la creación de ondas gravitacionales por procesos cuánticos durante un periodo inflacionario inicial, o su posterior formación por procesos asociados a las posibles transiciones de fase que puedan haber ocurrido a lo largo de la historia del universo, o la evolución de una red de cuerdas cósmicas.

Muchos de estos procesos ocurren en un momento dado en la historia del universo, por ejemplo, el momento en que el universo se enfría lo suficiente como para producir una transición de fase. La producción

de ondas gravitacionales en ese momento particular deja su huella en el espectro de frecuencias de estas ondas mediante la aparición de un pico de señal a una frecuencia característica asociada con ese tiempo. Siguiendo este razonamiento se demuestra que la época cosmológica correspondiente a la escala característica de la banda de frecuencias de NANOGrav hoy en día se encuentra en el universo temprano. Para ser más precisos, la temperatura típica del universo era del orden de 100 MeV cuando se produjeron estas ondas que vemos hoy en día en la banda de nano-Hercios. Esto nos dice que este tipo de experimentos no solo son una herramienta para astrofísica y cosmología, sino que tienen unas implicaciones muy importantes para la física de partículas más allá del modelo estándar.

Es por lo tanto claro que la posible identificación de todo o parte del fondo observado con un proceso en el universo primordial tendría sin lugar a dudas un impacto muy importante en el desarrollo de la física de partículas. Incluso si en el futuro llegásemos a tener la certeza de que toda esta señal es de origen astrofísico, esta observación nos permitirá poner cotas importantes en los parámetros que caracterizan los modelos de física de partículas. Algo que hoy en día no podemos hacer por ningún otro método.

Uno de los artículos recientemente publicados por NANOGrav [2] examina la posibilidad de que algunos de estos modelos del universo primordial puedan dar cuenta de los datos observacionales obtenidos. Los resultados de este estudio indican que, si bien existen varios modelos capaces de explicar los datos, no se observa una preferencia estadística clara de estos modelos frente a aquellos basados puramente en fuentes astrofísicas descritas anteriormente. No obstante, las limitaciones impuestas por estas observaciones nos permiten excluir, a día de hoy, cierto espacio de parámetros en las teorías previamente propuestas.

OTRAS COLABORACIONES

El mismo día del anuncio de NANOGrav, el 29 de Junio de 2023, y de forma coordinada, otras colaboraciones internacionales dedicadas a la detección de ondas gravitacionales con PTAs (EPTA: European Pulsar Timing Array, PPTA: Parkes Pulsar Timing Array, CPTA: Chinese Pulsar Timing Array)

publicaron de forma simultánea el resultado de sus observaciones. Sus resultados son consistentes con los obtenidos por NANOGrav. Este hecho es particularmente relevante teniendo en cuenta que estas observaciones son en gran medida complementarias ya que usan datos provenientes de, en muchos casos, distintos pulsares, así como procesamiento de datos independientes. Todo esto nos da mayor confianza en la existencia real de este fondo de ondas gravitacionales que inunda nuestro universo.

Existe además un consorcio de colaboraciones denominado IPTA (“International Pulsar Timing Array”) que agrupa a los diferentes esfuerzos observacionales a nivel internacional en este rango de frecuencias. Uno de los objetivos de este consorcio es realizar un análisis de los datos obtenidos por el conjunto de todas las colaboraciones de una forma unificada. Esto quiere decir, en la práctica, que el número efectivo de púlsares involucrados en el nuevo análisis conjunto se verá incrementado de forma considerable. La esperanza es que este nuevo análisis, con mayor estadística nos permita alcanzar una evidencia irrefutable de la existencia de la señal estocástica de ondas gravitacionales y una mejor caracterización de esta señal.

FUTURO

Estos resultados marcan, sin lugar a duda, un hito en la historia de la astronomía gravitacional y nos permiten observar el cosmos desde una perspectiva completamente nueva para nosotros. Los próximos años nos deparan un futuro ciertamente excitante en este campo de la astronomía. Por un lado, la mejora continua de los experimentos tanto en el equipamiento como en el tratamiento de datos nos permitirá detectar señales de eventos astrofísicos a los que aun no hemos tenido acceso con los medios actuales. Por otro, la incorporación de un buen número de nuevos púlsares nos servirá también para reducir la incertidumbre de los parámetros que determinan el tipo de espectro observado.

Por todo esto esperamos que en los próximos años los nuevos datos obtenidos puedan proporcionarnos la capacidad de detectar fenómenos para los cuales los datos recopilados por NANOGrav hasta ahora no han encontrado una evidencia. En particular, si la señal observada es efectivamente producida por procesos

astrofísicos, su distribución espacial debería estar correlacionada con la presencia de materia y por lo tanto no debería tener una señal totalmente isotrópica. La evidencia de algún tipo de anisotropía nos permitiría discernir entre las distintas opciones que podrían dar lugar a las observaciones que hemos descrito más arriba. Por ejemplo, muchos de los modelos cosmológicos estudiados hasta la fecha predicen la existencia de un fondo meramente isotrópico.

Por otro lado, en los próximos años deberíamos empezar a ser capaces de observar fuentes puntuales suficientemente cercanas. Esto dependerá por supuesto de cuan claras son estas señales sobre el ruido de fondo, pero las previsiones actuales ponen esta detección en el horizonte de los próximos años.

Todas estas nuevas observaciones nos permitirán dar respuestas a muchos interrogantes relacionados con astrofísica y cosmología y entender mejor nuestro universo. Sin embargo, lo quizás más interesante es pensar en los nuevos fenómenos que podremos descubrir gracias a esta nueva forma de observar el universo. En otras palabras, en el futuro quizás podamos corroborar no solo los modelos que ya conocemos sino aquellos que aún no están escritos.

REFERENCIAS

- [1] “The NANOGrav 15 yr Data Set: Evidence for a Gravitational-wave Background”, NANOGrav Collaboration, Adeela Afzal et al. ; *Astrophys. J. Lett.* 951 (2023) 1, L8; 2306.16213 [astro-ph.HE].
- [2] “The NANOGrav 15 yr Data Set: Search for Signals from New Physics”; NANOGrav Collaboration, Adeela Afzal et al. ; *Astrophys. J. Lett.* 951 (2023) 1, L11; 2306.16219 [astro-ph.HE].
- [3] NANOGrav website (<https://nanograv.org/>).

INFORMACIÓN ADICIONAL

Jose J. Blanco-Pillado está afiliado al EHU Quantum Center de la UPV, es profesor de investigación Ikerbasque y es miembro asociado de la colaboración NANOGrav.

Xavier Siemens es co-director del *NANOGrav Physics Frontier Center* financiado por *National Science Foundation* (NSF).

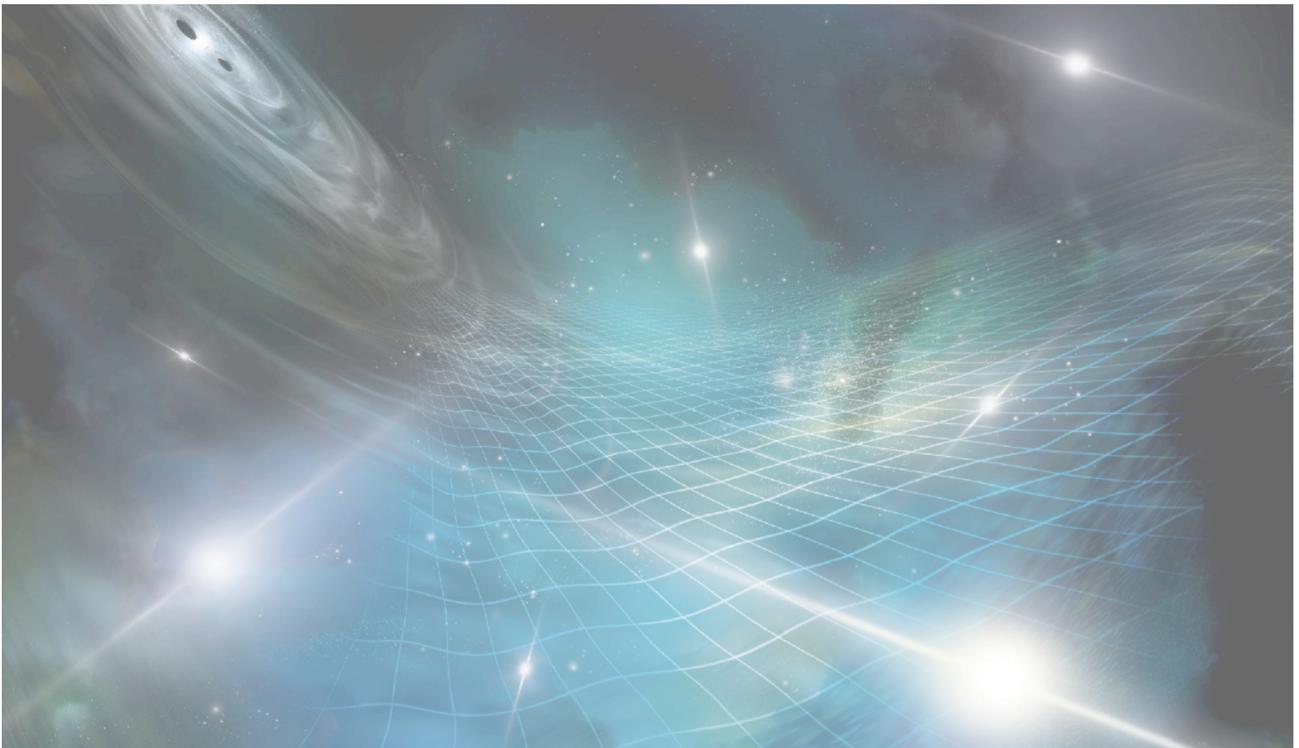


Figura 8. Interpretación artística de una serie de púlsares afectados por ondas gravitacionales producidas por un agujero negro binario supermasivo en una galaxia distante, que ondulan el espacio-tiempo (Aurore Simonnet/NANOGrav).

La isla de la Palma fue el lugar elegido para el simposio científico “20 MAGIC years”, con el motivo de celebrar los 20 años en los que el experimento MAGIC ha estado funcionando en el observatorio Roque de los Muchachos. Este evento ocurrió entre el 4 y el 6 de Octubre del 2023, y albergó a más de 150 personas.



David Paneque
Max Planck Institute for Physics
dpaneque@mpp.mpg.de

Portavoz de la colaboración MAGIC

LOS TELESCOPIOS MAGIC Y LA ASTRONOMÍA DE RAYOS GAMMA

El sistema de telescopios MAGIC (*Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov*) está diseñado para realizar astronomía de rayos gamma en el rango de energía desde aproximadamente 20 GeV hasta más de 100 TeV. La instalación consiste en dos telescopios, cada uno con un espejo de 17 metros de diámetro, ubicados en el Observatorio Roque de los Muchachos (ORM). Los telescopios MAGIC son operados por una colaboración internacional de más de 270 físicos (incluyendo estudiantes y científicos asociados) de trece países, en la cual España ha desempeñado un papel muy importante desde el principio.

El campo de la astronomía de rayos gamma de alta energía es una disciplina relativamente nueva, que comenzó a fines de la década de 1980 y principios de la década de 1990 con el descubrimiento (a un nivel de significancia superior a 5σ) de algunas fuentes de rayos gamma. Desde entonces, ha evolucionado considerablemente y hoy nos brinda una nueva ventana para estudiar con precisión los objetos astrofísicos, y una gran cantidad de posibilidades que antes no existían. Los instrumentos más sensibles para llevar a cabo la astronomía de rayos gamma por encima de aproximadamente 20 MeV son los telescopios que realizan una detección directa de los rayos gamma desde el espacio. Por encima de aproximadamente 20 GeV, los instrumentos más sensibles son los telescopios Cherenkov (IACT, *Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes*) que detectan los rayos gamma a través de la medición de los fotones Cherenkov emitidos en las cascadas atmosféricas extendidas (EAS, *Extended Air Shower*) inducidas por los rayos gamma en la atmósfera terrestre. En este caso, la atmósfera sirve como elemento del detector (calorímetro), y se pueden lograr áreas efectivas de recolección grandes, aproximadamente de 10^5 m^2 , lo que permite la medición precisa de cantidades muy pequeñas de rayos gamma.

MAGIC fue inaugurado el 10 de octubre de 2003, y comenzó su operación científica con un solo telescopio (observaciones mono) en 2004 [Albert et al., 2008a] y, junto con H.E.S.S. (que comenzó en 2002) y VERITAS (que comenzó en 2007), pertenece a la llamada segunda generación de IACTs. Después de



Figura 1. Telescopios MAGIC, de 17 m de diámetro, en el Observatorio Roque de los Muchachos. El edificio entre los dos telescopios es la casa de control, que contiene la electrónica para hacer el primer filtrado estereoscópico de los datos.

la construcción del segundo telescopio (MAGIC-II), la operación científica con dos telescopios (observaciones estéreo) comenzó en 2009 [Aleksic et al., 2012]. El sistema fue mejorado aún más, entre otras cosas, con una mejor cámara de tubos fotomultiplicadores (PMTs, *photomultiplier tubes*) para el primer telescopio (similar a la del segundo telescopio) y un mejor sistema de lectura de datos, y reinició las operaciones científicas con un rendimiento mejorado en 2013 (ver detalles en [Aleksic et al., 2016a, 2016b]).

Con el tiempo, debido a varias intervenciones de hardware y mejoras en el software y las estrategias de análisis, la sensibilidad de MAGIC ha mejorado aproximadamente en un factor 4 alrededor de 0.4 TeV (la energía en la que la sensibilidad de MAGIC es mejor), y en más de un factor 10 por debajo de 0.2 TeV. Esta evolución de la sensibilidad de MAGIC con el tiempo se representa en la Fig. 2. Debido a que la sensibilidad está limitada por el fondo (*background*), la capacidad de medir con precisión la emisión de una fuente de rayos gamma escala con la raíz cuadrada del tiempo. Por lo tanto, a energías por debajo de 0.1 TeV, actualmente, 1 hora de observación de MAGIC es comparable a más de 100 horas de MAGIC durante sus primeros años de operación. Lo que ha impulsado el potencial de descubrimiento científico de MAGIC.

La operación de MAGIC es gestionada por la colaboración del mismo nombre, que es responsable desde su diseño y construcción hasta su operación y explotación científica. Las observaciones se llevan a cabo por grupos de investigadores pertenecientes a los 13 países colaboradores, y de un equipo local de apoyo.

200 PUBLICACIONES CIENTÍFICAS Y SUMANDO

El primer telescopio MAGIC comenzó a funcionar en octubre de 2003, pero la puesta en funcionamiento no terminó hasta el otoño del año 2004, cuando el instrumento empezó a realizar observaciones científicas regulares. Las primeras publicaciones científicas con datos MAGIC aparecieron en el año 2006, y desde entonces, la colaboración MAGIC ha publicado más de 200 publicaciones en revistas de referencia, incluidas 6 en *Science* y 3 en *Nature*. En general, estas publicaciones abordan diversas esferas científicas, desde la astrofísica convencional, como las relacionadas con el núcleo galáctico activo de galaxias (AGN), los remanentes de supernovas (SNRs) y los púlsares, hasta estudios de física fundamental como la búsqueda de partículas de materia oscura (DM, *Dark Matter*), la violación de la invariancia de Lorentz (LIV, *Lorentz Invariance Violation*) y la cosmología relacionada con la luz de fondo extragaláctica (EBL, *Extragalactic Background Light*).

Hay una gran cantidad de ciencia en las 200 publicaciones de las últimas dos décadas, que no se puede describir en un breve informe como este. Pero vale la pena mencionar que algunos de estos artículos con datos de MAGIC llevaron a la primera detección de una nueva clase de fuente o un nuevo evento. Este es el caso de la primera detección de variabilidad de flujo con escala de tiempo de minutos detectada en un objeto tipo BL Lac (Mrk501) [Albert et al., 2007], la primera detección de un Radio Cuásar de Espectro Plano (FSRQ, *Flat Spectrum Radio Quasar*) a muy altas energías (3C279) [Albert et al., 2008b], la primera detección de emisión pulsada de muy alta energía (pulsar de Cangrejo) [Aliu et al., 2008], la primera detección de variabilidad de flujo con escalas de tiempo de minutos para un

FSRQ (PKS1222+21) [Aleksic et al., 2011] y una radio-galaxia (IC310) [Aleksic et al., 2014], el primer blazar con lente gravitacional a muy altas energías [Ahnen et al., 2016], la primera detección de emisión pulsada que alcanza energías TeV [Ansoldi et al., 2016], la primera asociación significativa (3σ) entre un neutrino de alta energía y una fuente de rayos gamma (TXS 0506+056) [Aartsen et al., 2018], el primer GRB detectado a muy altas energías (GRB190114C) [Acciari et al., 2019a], la primera detección del componente Compton inverso de un GRB [Acciari et al., 2019b], la primera evidencia de aceleración de protones en una explosión de Nova (RS Ophiuchi, junto con la colaboración H.E.S.S.) [Acciari et al., 2022a], y la primera fuente VHE más allá de $z=1$ (GRB 201216C) [Abe et al., 2023a].

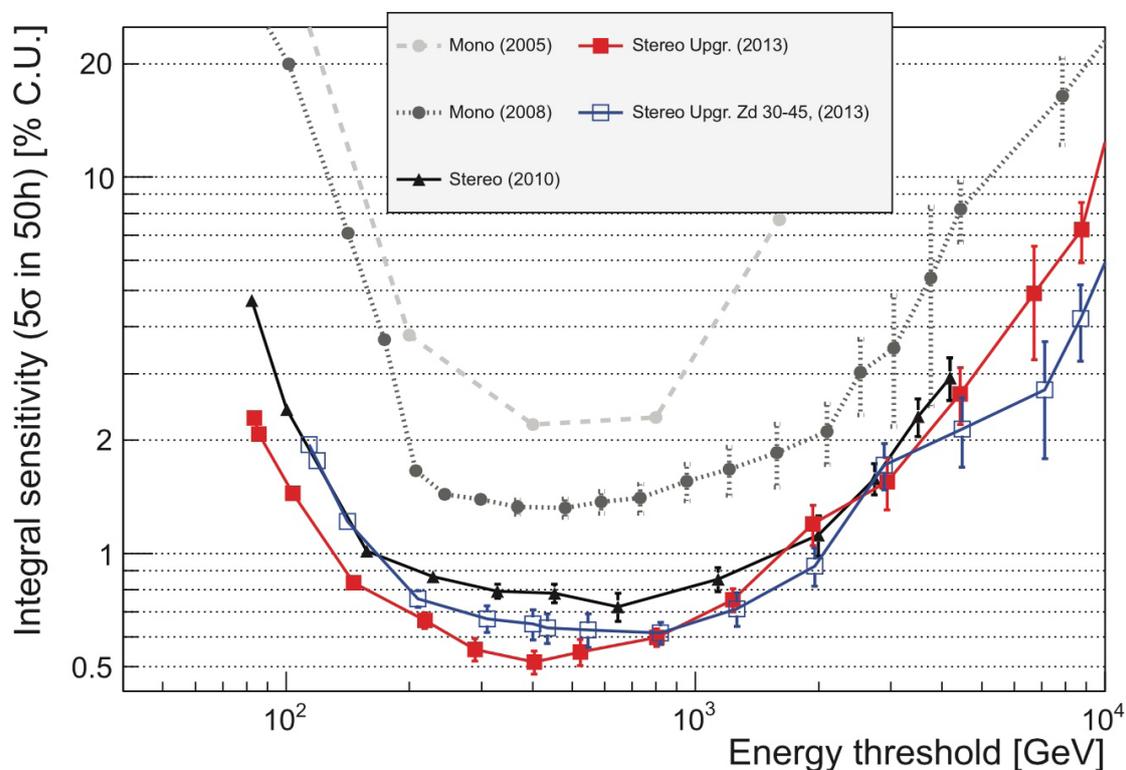


Figura 2. Evolución histórica de la sensibilidad integral de los telescopios MAGIC. La sensibilidad nos informa sobre la habilidad del instrumento para detectar flujos (pequeños) de rayos gamma, y está definida como el flujo integrado de una fuente por encima de una energía dada para la cual $N_{\text{exceso}} / \sqrt{N_{\text{fondo}}} = 5$ después de 50 horas de tiempo efectivo de observación. Figura extraída de [Aleksic et al., 2016b].

Se puede ver que la palabra “*primer*” se usa en todas estas publicaciones que han tenido un gran impacto en la comunidad científica. MAGIC fue concebido inicialmente como un instrumento para explorar, para medir cosas nuevas, y esto es algo que la colaboración MAGIC ha estado haciendo durante los últimos años.

Entre los recientes logros realizados por MAGIC, me gustaría explicar con algún detalle dos de ellos, la primera detección de explosiones de rayos gamma (GRBs), y el papel de MAGIC en esta nueva disciplina llamada astronomía de multi-mensajeros.

EL INICIO DE UNA NUEVA ERA PARA ESTUDIAR LAS EXPLOSIONES DE RAYOS GAMMA

Las explosiones de rayos gamma (GRB, *Gamma Ray Bursts*) fueron descubiertas de forma casual a finales de la década de 1960 como explosiones esporádicas de rayos gamma MeV que aparecen en ubicaciones celestes aleatorias, y que se convierten en los objetos más brillantes en el cielo durante escalas de tiempo del orden de minutos. La emisión de un GRB consta de dos componentes, el *prompt* y el *afterglow*. El primero ocurre principalmente en energías MeV y dura hasta cientos de segundos. El segundo abarca un rango de energía mucho más amplio, desde las frecuencias en radio a los rayos gamma de alta energía, y decae gradualmente en escalas de tiempo mucho más largas, siendo detectable incluso meses después del inicio del GRB. Según el modelo “firefall” [Piran 1999], que es uno de los escenarios teóricos más utilizados para interpretar el fenómeno GRB, tanto las emisiones *prompt* como las de *afterglow* se producen en jets de plasma colimados que son lanzados desde un motor central y que se mueven a velocidades relativísticas. Se cree que el *prompt* se produce en los choques dentro del propio jet (*internal shocks*) y el *afterglow* en los choques producidos cuando el jet interactúa con el medio exterior (*external shocks*). Desde el punto de vista observacional, utilizando la duración de su fase *prompt*, los GRB se clasifican en dos grupos, cortos y largos, con duración típica observada más corta o más larga que 2 segundos, respectivamente. Las dos clases están vinculadas a diferentes sistemas progenitores que en última instancia conducen a la formación del jet en el GRB. Los GRB largos se observan en asociación con explosiones de supernovas de estrellas masivas, mientras que los GRB

cortos se cree que son producidos por la fusión de estrellas de neutrones binarias. (BNS, *Binary Neutron Stars*). La detección conjunta de las ondas gravitacionales (GW) y los rayos gamma de GW 170817/GRB170817A [Abbott et al., 2017] demostró que, al menos algunos de los GRB cortos, se originan en los sistemas BNS fusionados.

Durante muchos años, se había teorizado que los GRB también deberían emitir rayos gamma de muy alta energía (VHE), pero tal detección había permanecido elusiva durante más de tres décadas debido a dos desafíos observacionales. El primero es que los GRB ocurren en tiempos y ubicaciones celestes impredecibles, y su emisión de rayos gamma suele desaparecer en escalas de tiempo que van desde segundos a horas. El pequeño campo de visión de los IACTs (de solo unos grados) les obliga a confiar en las alertas externas de instrumentos de gran campo de visión, como Swift-BAT y Fermi-GBM, para recibir las coordenadas de los GRB, lo que introduce un retraso en el inicio de las observaciones. Además, los IACTs sólo pueden operar durante las noches con buenas condiciones atmosféricas y luz lunar “no demasiado brillante”, por lo que tienen ciclos de operación relativamente cortos (aproximadamente 1000 horas por año). Los eventos explosivos pueden ocurrir durante el día o durante las condiciones meteorológicas adversas, lo que significa que las observaciones con IACTs pueden no ser posibles. El segundo desafío, que es muy específico para la banda de muy altas energías, es el efecto de la luz de fondo extragaláctica (EBL, *Extragalactic Background Light*). El EBL es el fondo difuso de la radiación infrarroja, óptica y ultravioleta que penetra en el espacio intergaláctico, constituyendo la emisión integrada a través de la historia del Universo, desde las primeras estrellas. Los rayos gamma de muy alta energía que provienen de objetos extragalácticos distantes, como los de GRBs, pueden colisionar con los fotones EBL y producir un par electrón-positrón. Esto provoca una atenuación del flujo de rayos gamma que es más severa para las energías fotónicas más altas y las distancias (o *redshifts* z) más grandes. Por lo tanto, la detección de esos rayos gamma VHE requiere no sólo telescopios con bajo umbral de energía, buena sensibilidad, capacidades de reposicionamiento rápido y un ciclo de operación largo, sino también GRBs que ocurren a *redshifts* inferiores a $z \sim 1$, lo que es raro porque la mayoría de ellos vienen de distancias más lejanas.

Los telescopios MAGIC fueron diseñados con el objetivo de detectar GRBs. El bajo umbral de energía está garantizado por el gran reflector y por métodos de análisis específicamente diseñados para ello, mientras que la estructura de fibra de carbono ligera (70 toneladas en total) permite una velocidad de reposición rápida de 7 grados/s (unos cuantos segundos para apuntar a cualquier parte del cielo). Esto es fundamental para el seguimiento de fuentes variables o explosiones como los GRB, dada su naturaleza impredecible. Gracias a estas características, después de muchos años con múltiples intentos, el 14 de enero de 2019, MAGIC logró la primera detección firme de un GRB en VHE, la detección del GRB 190114C. Este acontecimiento fue inmediatamente comunicado a la comunidad de astrofísica (ATel #12390, <https://www.astronomerstelegram.org/?read=12390>), que desencadenó un gran número de observaciones con instrumentos que cubrieron un gran rango de energías, de radio a rayos gamma de muy alta energía.

GRB 190114C fue detectado por primera vez con los instrumentos Swift-BAT y Fermi-GBM, lo que mostró que era un GRB largo, y desencadenó, entre otras cosas, observaciones ópticas con el Gran Telescopio de Canarias (GTC), en el Roque de los Muchachos, que se utilizaron para determinar la distancia de este objeto a $z = 0.4245 \pm 0.0005$ (GCN CIRCULAR 23708). Los telescopios MAGIC comenzaron las observaciones de GRB 190114C a partir de un zenit de unos 56 grados, 57 segundos después del inicio del GRB, para una exposición total de 4,1 horas bajo la iluminación de la luna (aproximadamente 6–8 mayor que la luz de fondo

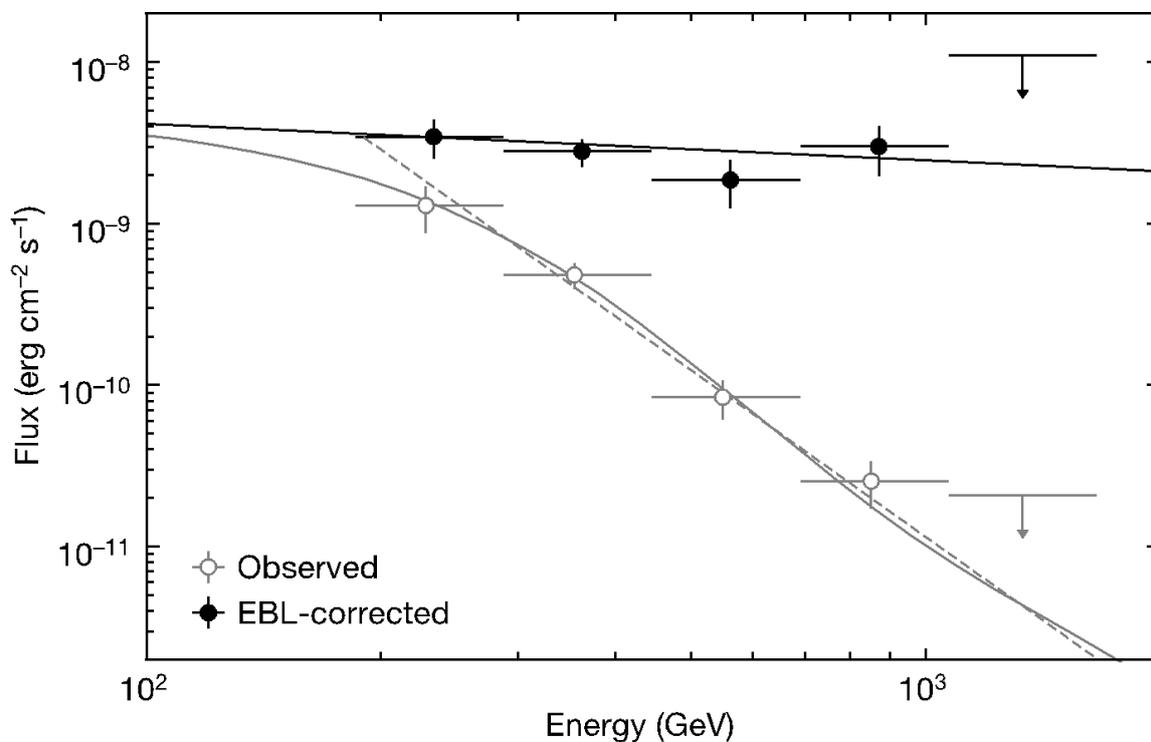


Figura 3. Espectro de rayos gamma de GRB 190114C por encima de 0.2 TeV, integrado durante los primeros 40 minutos de observación con MAGIC. Figura extraída de [Acciari et al., 2019a].

durante una noche sin luna). A pesar de las difíciles condiciones de observación, que disminuyeron la sensibilidad y aumentaron las energías mínimas de rayos gamma que se podían detectar con MAGIC, este GRB fue claramente detectado (50σ) por encima de 300 GeV. La capacidad de los telescopios MAGIC para operar con éxito durante la presencia de la luna (sin precedentes entre los telescopios Cherenkov) fue un factor crucial para lograr esta notable detección. La figura 3 muestra el espectro de rayos gamma VHE observado e intrínseco (es decir, corregido para el efecto de absorción de EBL) integrado en el tiempo en los primeros 40 minutos de la observación. El espectro observado está dominado por los fotones de baja energía, con un pronunciado índice espectral $\alpha_{\text{obs}} \sim 5$ debido a la fuerte absorción de EBL, mientras que el intrínseco es consistente con un espectro plano ($\alpha_{\text{int}} \sim 2$).

Los fotones de alta energía detectados por MAGIC tienen energías muy superiores a la energía máxima que es alcanzable con la emisión de sincrotrón originada en una sola región donde los electrones se aceleran (lo que se denomina el límite "burnoff", véase [Acciari et al., 2019a] para más detalles). Por lo tanto, los resultados con MAGIC indican claramente la necesidad de un mecanismo de radiación adicional, aparte de la emisión de fotones sincrotrón. Varios modelos teóricos proponen la emisión Compton inversa (*inverse Compton*), en su variante sincrotrón-auto-Compton (SSC, *synchrotron self-Compton*), como uno de los principales modelos leptónicos que permiten la producción de fotones hasta energías TeV. Por esta razón, la emisión espectral extendida de rayos X a los rayos gamma VHE se modeló en dos bandas temporales diferentes (con datos simul-

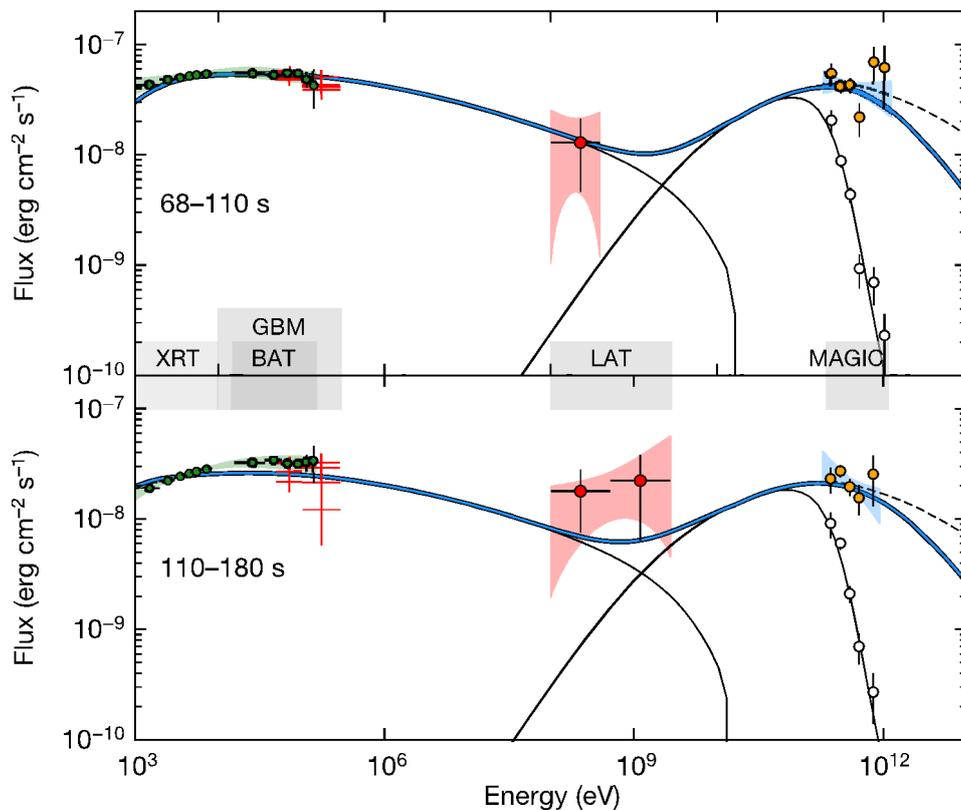


Figura 4. Modelo teórico del espectro extendido de GRB 190114C en los intervalos de tiempo 68-110 s y 110-180 s después del inicio. Figura extraída de [Acciari et al., 2019b].

táneos XRT, LAT y MAGIC) con un modelo de *afterglow* en el choque externo (*external shock*). El modelo considera dos componentes de emisión (Fig. 4), el sincrotrón hasta la banda Fermi-LAT, y el SSC para los datos de MAGIC. Comparando las emisiones de sincrotrón y SSC, se puede ver que la cantidad de energía emitida por estos dos procesos es muy similar. Esto es importante para comprender la física del *afterglow*, y para estimar correctamente la energía que puede ser transferida en última instancia a las partículas o el campo magnético.

El anuncio de la detección de GRB 190114C con MAGIC marcó el comienzo de una nueva era para estudiar GRBs. Después de eso, la colaboración H.E.S.S anunció la detección en VHE de dos GRB largos adicionales en el año 2019 (GRB 180720B y GRB 190829A), y la colaboración MAGIC anunció un cuarto GRB largo a finales del año 2020 (GRB 201216C). Finalmente, la colaboración LHAASO informó de la detección de fotones TeV de un quinto evento, GRB221009A, el GRB más brillante de todos los tiempos.

Además de las detecciones mencionadas anteriormente, existen otros dos GRB observados con MAGIC, GRB 160821B y GRB 201015A, que se detectaron de manera marginal (3σ). El primero es de gran interés porque, a diferencia de los cinco GRB detectados significativamente ($>5\sigma$) en VHE hasta la fecha, este es un GRB corto, y la emisión de kilonova se confirmó con observaciones en visible. Esta es la indicación de que el progenitor de este GRB fue probablemente un sistema BNS, cuyos GWs podrían haber sido detectados por interferómetros terrestres si hubieran estado operativos en el momento del evento [Acciari et al., 2021]. La evidencia de la señal observada por MAGIC en GRB 160821B es muy prometedora para las detecciones conjuntas GW-GRB, dado el cuarto ciclo de operación de LIGO, Virgo y Kagra que ya comenzó en el año 2023.

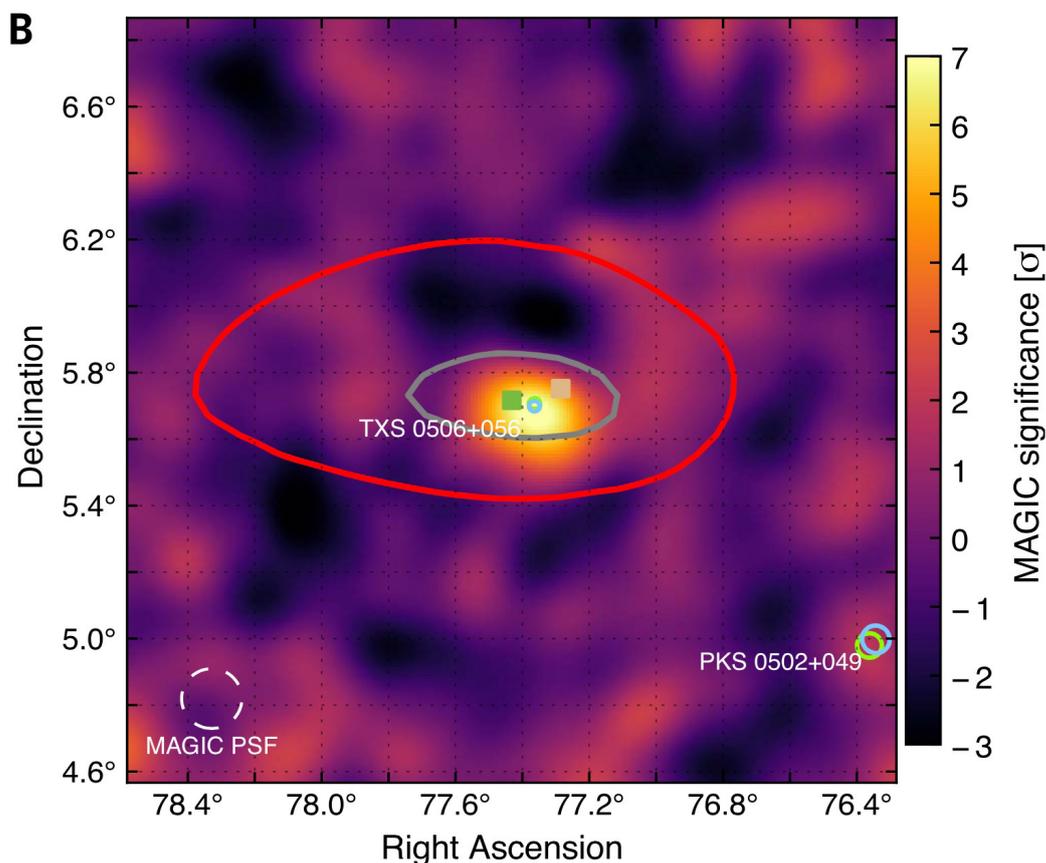
EL PAPEL DE MAGIC EN LA ASTROFÍSICA DE MULTI-MENSAJEROS

Después de más de 100 años desde el descubrimiento de los rayos cósmicos (CRs, *Cosmic Rays*), su origen astrofísico sigue sin resolverse, lo que lo convierte en una de las cuestiones clave en la astrofísica de altas energías. Esto se refiere tanto al ori-

gen de las energías Galácticas (hasta PeV) como a las extragalácticas de alta energía (UHECRs; hasta $\sim 10^{20}$ eV). La observación de estos CRs energéticos implica la existencia de fuentes y mecanismos de aceleración que operan en condiciones extremas. El estudio de estos excepcionales entornos astrofísicos a través de observaciones astronómicas permite explorar la física fundamental y hacer descubrimientos revolucionarios, como ha ocurrido muchas veces en la historia. Dado que los CRs tienen carga eléctrica y se desvían en diversos campos magnéticos (por ejemplo, el campo magnético intergaláctico y el de nuestra propia galaxia), uno no puede relacionar directamente, por ejemplo, las mediciones UHECR realizadas en la Tierra (por el Observatorio Pierre Auger) con sus fuentes, sino que tiene que confiar en información complementaria, como la que viene de sus productos secundarios neutrales: los fotones de alta energía (HE) y los neutrinos. Sin embargo, la sensibilidad de los instrumentos de neutrino actuales (como IceCube, Baikal o KM3Net) todavía no es lo suficientemente buena como para detectar significativamente ($> 5\sigma$) fuentes astrofísicas individuales. En este contexto, los rayos gamma desempeñan un vínculo crucial entre la astronomía de fuentes variables (*time-domain astrophysics*) y la astrofísica de multi-mensajeros porque son la forma más energética de luz, y, por lo tanto, las energías más cercanas a los neutrinos de alta energía detectados por IceCube, y los rayos cósmicos de Ultra Alta Energía detectados por Pierre Auger. Se espera que los rayos gamma también se produzcan en algunos de los eventos explosivos que producen GWs.

Además del Sol y SN 1987A, que se detectaron en fotones y neutrinos de baja energía hace varias décadas, los eventos multi-mensajeros más importantes, recientemente detectados por la comunidad astronómica, son los siguientes tres: 1) GW170817/GRB 170817A, una fusión binaria de estrellas de neutrones detectada con ondas gravitacionales y con rayos gamma [Abbott et al. 2017]; 2) IceCube170922/TXS 0506+056, la asociación más significativa de un neutrino de alta energía con un blazar de rayos gamma [Aartsen et al. 2018]; y 3) NGC 1068, la fuente más importante de neutrinos TeV hasta la fecha, donde la ausencia de rayos gamma de muy alta energía tiene una fuerte implicación para la comprensión de la producción de neutrinos de gran energía [Abbasi

Figura 5. Posición celeste de IceCube-170922A en las coordenadas ecuatoriales J2000, superpuesto a un mapa de significancia de señales gamma por encima de 90 GeV obtenidas con MAGIC. Figura extraída de [Aarsten et al., 2018].



et al. 2022]. De los tres acontecimientos mencionados, los datos de MAGIC desempeñan un papel fundamental en dos de ellos: en la detección VHE de TXS 0506+056 y en la falta de detección VHE de NGC 1068. En los párrafos siguientes describiré brevemente la situación relacionada con estos dos notables descubrimientos.

IceCube170922/ TXS 0506+056: primera coincidencia de un blazar con un neutrino de alta energía

El 22 de septiembre de 2017, el observatorio de neutrinos IceCube midió un evento de ~ 290 TeV (denominado IceCube-170922A) cuya ubicación fue reconstruida con una precisión mejor que 0.1 grados, y que coincidía posicionalmente con el blazar TXS 0506+056. En menos de un minuto de esta detección, la colaboración de IceCube alertó a la

comunidad científica (GCN Circular, 21916), desencadenando búsquedas de seguimiento por muchos telescopios sobre un amplio rango de longitudes de onda. Este esfuerzo de observación mostró, entre otras muchas cosas, que había rayos gamma de alta energía (HE) y muy alta energía (VHE) procedentes de este objeto, como se midió por Fermi-LAT (ATel, #10791) y los telescopios MAGIC (ATEL, # 10817). La figura 5 muestra el mapa del cielo con datos gamma de MAGIC con eventos por encima de 90 GeV. Los otros IACT de segunda generación, H.E.S.S. y VERITAS, no pudieron detectar TXS 0506+056 en ese momento, a pesar de haberlo observado simultáneamente con MAGIC. Esta falta de detección se explica con la menor sensibilidad de estos dos telescopios Cherenkov, con respecto a MAGIC, para detectar energías de rayos gamma por debajo de

0.2 TeV. Debido a la absorción de las interacciones gamma-gamma, que pueden ocurrir tanto en el interior de la fuente (debido a los fotones locales de baja energía) y en la propagación de los rayos gamma de TXS 0506+056 (redshift $z=0.34$) a la Tierra (debida a la luz de fondo extragaláctica), la cantidad de rayos gamma por encima de 0.1 TeV que llegan a la tierra disminuye sustancialmente, y es difícil detectar rayos gamma con energías por encima de 0.4 TeV. H.E.S.S. y VERITAS tienen una sensibilidad ligeramente mejor que MAGIC por encima de 0.3 TeV, pero esta fuente era difícilmente detectable en estas energías. Esto mostró, una vez más, la importancia de las observaciones altamente sensibles por debajo de 0.2 TeV, y el gran potencial de descubrimiento de los telescopios MAGIC con respecto a los otros telescopios Cherenkov que están actualmente en funcionamiento.

La probabilidad de que el neutrino de alta energía se detecte por coincidencia aleatoria con este blazar en estado de explosión (*flare*), detectado por Fermi-LAT y MAGIC, se puede excluir con un nivel de confianza de 3σ , principalmente debido a la determinación precisa de la dirección de IceCube-170922A. Este acontecimiento es la asociación más significativa entre una fuente de rayos gamma y un neutrino de alta energía, lo que sugiere que los blazares pueden de hecho ser una de las fuentes de los rayos cósmicos de gran energía, y por lo tanto parcialmente responsables del flujo cósmico de neutrinos observado por IceCube. Estas investigaciones, que se realizaron junto con las colaboraciones IceCube y Fermi-LAT, entre muchos otros grupos, fueron publicadas en la revista Science en 2018 [Aarsten et al., 2018].

Estas mediciones ofrecieron una oportunidad única para explorar la interacción entre los fotones energéticos, los neutrinos y los rayos cósmicos, y, por consiguiente, muchos autores utilizaron estos datos y los interpretaron dentro de diferentes escenarios teóricos. Una observación importante, en particular en [Ansoldi et al., 2018], es que el prominente cutoff espectral observado por MAGIC por encima de ~ 0.1 TeV, durante la alta y baja actividad de los rayos gamma, confirma la absorción interna de gamma-gamma que se espera como consecuencia de la producción de un neutrino ~ 290 TeV a través de interacciones proton-gamma. Así, la interpretación derivada con es-

tos datos refuerza la asociación entre las señales que vienen de mensajeros múltiples: fotones y neutrinos.

NGC 1068, la mayor señal de neutrino de altas energías en los datos de IceCube

La detección coincidente de neutrinos de alta energía y rayos gamma del blazar TXS 0506+056 da una prueba convincente (alrededor de 3σ) de la primera fuente extragaláctica de neutrinos [Aarsten et al., 2018]. Sin embargo, varios análisis independientes indican que los blazares sólo pueden representar menos del 30% del flujo de neutrino difuso medido por IceCube [Aarsten et al., 2017], y por lo tanto vale la pena investigar otros tipos de fuentes potenciales de neutrinos, como las galaxias formadoras de estrellas (*starburst galaxies*) incluyendo AGNs del tipo Seyfert. Se espera que la emisión de rayos gamma y neutrinos en las galaxias formadoras de estrellas se produzca por rayos cósmicos que interactúan con el medio interestelar y producen piones cargados y neutrales que se descomponen rápidamente en rayos gamma y neutrinos.

Los espectros de rayos gamma producidos por las galaxias Seyfert y las que forman estrellas (*starburst galaxies*), según los modelos teóricos AGN jet y AGN wind difieren significativamente en la banda VHE, donde los IACTs son más sensibles que Fermi-LAT. Específicamente, el modelo leptónico AGN jet presenta un corte a energías de alrededor de 100 GeV, mientras que los modelos de *starburst* y *AGN wind* se extienden en la banda VHE, pero con diferentes formas espectrales. Esto significa que una detección en la banda VHE desempeñaría un papel clave en la ruptura de las degeneraciones entre los diversos modelos teóricos. Por esta razón, la colaboración MAGIC llevó a cabo una extensa observación de 125 horas sobre NGC 1068, que es la más brillante de todas las galaxias *starburst* y Seyfert-2 detectadas en energías GeV con Fermi-LAT. A pesar de la fuerte señal de rayos gamma medida con Fermi-LAT, que se extiende a unos 30 GeV, los datos MAGIC no muestran ningún exceso significativo de rayos gamma VHE [Acciari et al., 2019c]. En el otoño de 2022, IceCube publicó un exceso con una significancia de 4.2σ en las coordenadas de la fuente NGC 1068, que hizo de esta fuente el exceso más significativo de neutrinos de alta energía en los datos de IceCube [Abbasi et al. 2022]. Este resultado de IceCube aumentó aún más el valor

científico de las 125 horas de datos recopilados con los telescopios MAGIC. ¿De dónde vienen estos neutrinos? Teniendo en cuenta que las emisiones de neutrino y rayos gamma son emisiones secundarias de la misma población de partículas madre de alta energía, se espera que los flujos de estos dos mensajeros producidos en la fuente sean comparables. Sin embargo, como se muestra en la Figura 6, la medición de MAGIC reporta un límite superior al flujo de rayos gamma TeV que es de dos órdenes de magnitud por debajo del flujo neutrino TeV medido por IceCube. Esto significa que los neutrinos de alta energía deben producirse en una región que absorba fuertemente los rayos gamma VHE. Una posible ubicación para ello es la cercanía del agujero negro supermasivo, donde los protones pueden acelerarse en un intenso campo electromagnético, o en los vientos producidos por el disco de acreción. Este es un claro ejemplo de los beneficios de la astronomía de mensajeros múltiples.

PERSPECTIVAS

Dos décadas después de la inauguración del primer telescopio, en octubre de 2003, MAGIC sigue realizando astronomía de rayos gamma en el rango de energía de unas pocas decenas de GeV a más de 100 TeV. A energías por debajo de 0.2 TeV, MAGIC sigue siendo el telescopio Cherenkov más sensible del mundo, y por lo tanto su potencial para hacer ciencia sigue siendo mayúsculo. Por ello, MAGIC continuará funcionando durante los próximos años, al menos hasta que la red de telescopios CTA-LST de 4 telescopios Cherenkov comience a operar científicamente, lo que puede ocurrir en algún momento después de 2026. En los próximos años, además de realizar observaciones regulares de rayos gamma, MAGIC también explorará dos modos de operación no-regulares (no estándar): observaciones conjuntas con el primer telescopio CTA-LST (LST-1) y observaciones de Interferometría de Intensidad Óptica.

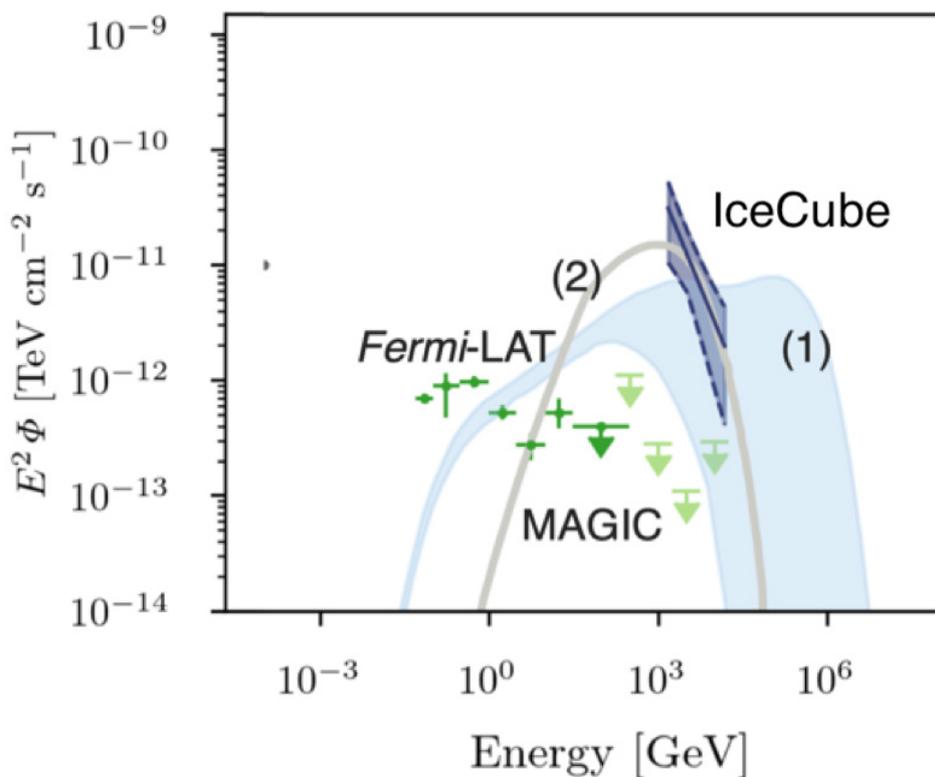


Figura 6. Distribución de la energía espectral (SED) de NGC 1068 obtenido con IceCube, Fermi-LAT y MAGIC. Imagen tomada (con algunas modificaciones editoriales) de [Abbasi et al., 2022].

El LST-1 está en la última etapa de puesta a punto, y ya ha comenzado a hacer ciencia. MAGIC y LST-1 pueden operarse eficazmente como un sistema de tres telescopios. A partir de simulaciones Monte Carlo y observaciones reales de la Nebulosa del Cangrejo se ha evaluado la sensibilidad de MAGIC+LST-1 en comparación con MAGIC-solo. El estudio indica que el sistema de tres telescopios alcanza una mejor sensibilidad por un factor de 1.3 en casi todo el rango de energía. Los resultados han sido aceptados recientemente para su publicación en A&A [Abe et al., 2023b]. Este aumento de la sensibilidad implica una reducción de la cantidad de tiempo por un factor 2 approx. (en comparación con las observaciones realizadas únicamente con MAGIC), que es una ganancia sustancial que vale la pena explotar durante los próximos años, hasta que el conjunto completo de los cuatro telescopios LST comience la operación científica.

Por otra parte, en los últimos años, los telescopios MAGIC se han preparado para realizar observaciones de interferometría de intensidad óptica, y las observaciones MAGIC ahora pueden utilizarse para medir de manera fiable el tamaño de diferentes

estrellas [Acciari et al 2022b]. La gran superficie reflectora de estos telescopios ($> 100 \text{ m}^2$), junto con su sensibilidad a las longitudes de onda azules y UV con un tiempo de respuesta más rápido que 10^{-9} segundos, proporcionan capacidades sin precedentes para explorar fuentes variables en visible con escalas de tiempo que van desde 10^{-3} segundos hasta 10^{-9} segundos. Esta capacidad abre una ventana completamente nueva de oportunidades científicas, que es la de estudiar la física estelar (tamaño y estructura) así como el de estudiar exoplanetas y asteroides a través de tránsitos y observaciones de ocultación de objetos. En los próximos años, la colaboración MAGIC seguirá desarrollando esta técnica, y la desplegará en el LST-1, lo que aumentará aún más la capacidad de realizar astrofísica de alta resolución temporal. Eventualmente, esta técnica no sólo permitirá hacer ciencia con el tamaño de las estrellas, sino que también debería permitir medir la oblicuidad de estrellas que giran rápidamente, oscurecimiento de extremidades de estrella o la variación en el tiempo del tamaño de las explosiones de Novas, lo que aumentará todavía más la cantidad de estudios físicos y descubrimientos que se pueden hacer con los telescopios MAGIC.

Foto de los participantes del simposio “20 MAGIC years” (Hotel Taburiente Playa, Los Cancajos). Credit: Jayant Abhir .



REFERENCIAS

- [Aartsen et al., 2017] Aartsen et al. 2017 ApJ 835.1, 45
- [Aartsen et al., 2018] Aartsen, M.G., Ackermann, M., et al. 2018, Science, 361, eaat1378
- [Abbasi et al., 2022] Abbasi et al. 2022, Science, 378, 538
- [Abbott et al., 2017] B. P. Abbott et al. 2017, ApJL 848.2, L12
- [Abe et al., 2023a] Abe H., Abe S., Acciari V.A. et al. 2023, accepted in MNRAS (arXiv:2310.06473)
- [Abe et al., 2023b] Abe, H., Abe, K., Abe, S., et al. 2023, accepted in A&A (arXiv:2310.01954)
- [Acciari et al., 2019a] Acciari, V.A., Ansoldi, S., et al. 2019, Nature, 575, 455
- [Acciari et al., 2019b] Acciari, V.A., Ansoldi, S., et al. 2019, Nature, 575, 459
- [Acciari et al., 2019c] Acciari V.A. et al. 2019 ApJ 883.2, 135
- [Acciari et al., 2021] Acciari et al. 2021, ApJ 908.1, 90
- [Acciari et al., 2022a] Acciari, V.A., Ansoldi, S., Antonelli, L.A., et al. 2022, Nature Astronomy, 6, 689.
- [Acciari et al., 2022b] Acciari V.A. et al. Proc. SPIE Optical and Infrared Interferometry and Imaging VIII. 2022, pp. 12183–11.
- [Ahnen et al., 2016] Ahnen, M.L., Ansoldi, S., Antonelli, L.A., et al. 2016, A&A, 595, A98
- [Albert et al., 2007] Albert, J., Aliu, E., Anderhub, H., et al. 2007, ApJ, 669, 862
- [Albert et al., 2008] Albert, J., Aliu, E., et al. 2008, Science, 320, 1752
- [Albert et al., 2008a] Albert, J., Aliu, E., Anderhub, H., et al. 2008, ApJ, 674, 1037.
- [Aleksic et al., 2012] Aleksić, J., Alvarez, E. A., Antonelli, L. A., et al. 2012, Astroparticle Physics, 35, 435.
- [Aleksic et al., 2016a] Aleksić, J., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., et al. 2016, Astroparticle Physics, 72, 61.
- [Aleksic et al., 2016b] Aleksić, J., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., et al. 2016, Astroparticle Physics, 72, 76
- [Aleksic et al., 2011] Aleksić, J., Antonelli, L.A., Antoranz, P., et al. 2011, ApJL, 730, L8
- [Aleksic et al., 2014] Aleksić, J., Ansoldi, S., Antonelli, L.A., et al. 2014, Science, 346, 1080
- [Aliu et al., 2008b] Aliu, E., Anderhub, H., Antonelli, L.A., et al. 2008, Science, 322, 1221.
- [Ansoldi et al., 2016] Ansoldi, S., Antonelli, L.A., Antoranz, P., et al. 2016, A&A, 585, A133
- [Ansoldi et al., 2018] Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arcaro, C., et al. 2018, ApJ, 863, L10.
- [Piran 1999] T. Piran. 1999, Physics Reports 314.6, 575–667.

CALAR ALTO: 50 AÑOS OBSERVANDO LOS CIELOS

El Centro Astronómico Hispano en Andalucía (CAHA), conocido popularmente como observatorio de Calar Alto, cumple 50 años siendo uno de los referentes de la comunidad astronómica internacional por su capacidad para atraer grandes proyectos observacionales basados en ciencia de primera línea.



Jesús Aceituno Castro
Centro Astronómico Hispano
en Andalucía (CAHA)
aceitun@caha.es

Ulrich Thiele
uthie@posteo.de

Gilles Bergond
Centro Astronómico Hispano
en Andalucía (CAHA)
gbergond@caha.es

Incluido en la lista de Instalaciones Científico Técnicas Singulares (ICTS) del estado español, basa su éxito mayormente en la calidad de sus telescopios y en su instrumentación puntera, que hacen posible la consecución de importantes resultados científicos. Además, su vocación divulgadora y educativa sitúa al observatorio cada vez más cercano al público interesado en los avances de la Astronomía. Este artículo propone un recorrido por las distintas etapas de la historia del observatorio, de la evolución de sus instalaciones, y de los principales proyectos científicos que han desarrollado.

El primer antecedente histórico de las campañas de observación en el entorno de la Sierra de los Filabres data del siglo XIX, y consistió en una campaña liderada por el general Ibáñez de Ibero en el pico de la Tetica de Bacares, con el propósito de establecer el primer enlace geodésico de Europa y África en 1879.

Casi 90 años después, en el año 1967 el prestigioso organismo germano de investigación *Max-Planck-Gesellschaft* (MPG) creó el Instituto de Astronomía (MPIA) en Heidelberg, con la idea de establecer un observatorio astronómico de nivel internacional en un lugar idóneo fuera de las fronteras de la República Federal de Alemania. Posteriormente, en el año 1968 la propia MPG comenzó una campaña de evaluación de la calidad del cielo en diferentes zonas de la costa mediterránea, incluyendo localizaciones en Italia, Turquía, España y Grecia. Los dos enclaves que mostraron condiciones más favorables fueron el Peloponeso, en Grecia, y la Sierra de los Filabres, en el sur de España. En el primero había más noches de buena calidad durante los meses de verano; y en el segundo el número de noches excelentes era mayor durante los meses de invierno. Finalmente se impuso el criterio de conseguir el mayor número de horas de observación posible, y se decidió que una ubicación en la Sierra de los Filabres a 2168 m de altitud, entre los municipios almerienses de Gérgal, Bacares y Serón, era la mejor opción para la instalación de un observatorio astronómico, que sería conocido a la postre como Observatorio de Calar Alto. En julio de 1972 los Gobiernos de España y de la República Federal de Alemania aprobaron la creación de un Centro Astronómico Hispano Alemán (CAHA) como entidad gestora del observatorio, que estaría “

Figura 1. Panorámica del observatorio.



destinado a la investigación pacífica del firmamento”, según decía el artículo 1 del convenio entre ambos países. Y un año después, en mayo de 1973, entró en vigor un acuerdo entre la Comisión Nacional de Astronomía y la MPG para la explotación científica del observatorio por un periodo de treinta años, y comenzaron las obras de construcción del mismo.

El primer telescopio del observatorio, de 1.23 m, comenzó a operar en el año 1975. Más tarde, en el año 1979 vio su primera luz el telescopio de 2.2 m, y se celebró la inauguración oficial del observatorio con la asistencia de SSMM los Reyes de España. En el año 1980 tuvo su segunda luz en Calar Alto el telescopio Schmidt, de 80 cm de apertura efectiva (el telescopio Schmidt tiene un espejo primario de 1.2 m de diámetro, pero su apertura efectiva se ve limitada por una lente correctora de 80 cm de diámetro), instalado originariamente en el observatorio de Hamburgo en 1954 y trasladado a Calar Alto en 1975. Y

ya en el año 1984 concluyeron las obras de construcción del telescopio de 3.5 m, aún hoy en día el más grande de la Europa continental. En los terrenos del observatorio se encuentra también un telescopio de 1.52 m perteneciente al Instituto Geográfico Nacional (IGN) y operado por el Observatorio Astronómico Nacional (OAN). La figura 1 muestra una panorámica del observatorio con la situación de los telescopios anteriormente mencionados.

El 12 de noviembre de 2004, se aprobó un nuevo acuerdo entre la MPG y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), con el beneplácito del Ministerio de Ciencia y Tecnología español, que estableció un nuevo marco de funcionamiento hasta el 31 de diciembre de 2013. Según este acuerdo, el CSIC actuaría en nombre de la comunidad astronómica española, y se creó la agrupación de interés económico CAHA-AIE para la dirección, gestión y operación del observatorio.

Más recientemente, el 18 de mayo de 2019, se materializó la transferencia de participación del MPG a la Junta de Andalucía, y desde entonces, el centro es cogestionado a partes iguales por el CSIC y la Junta de Andalucía. Esta nueva modificación estatutaria tuvo como consecuencia el cambio de nombre de la entidad gestora, pasando a llamarse Centro Astronómico Hispano en Andalucía, manteniendo las siglas CAHA. En la actualidad, el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), centro distinguido con la acreditación Severo Ochoa, actúa como institución científica de referencia responsable de la estrategia científica y de los nuevos desarrollos del observatorio. Esto da lugar a una relación sinérgica, en la que el IAA-CSIC participa en varios desarrollos instrumentales para CAHA, y a su vez CAHA acoge varios instrumentos y experimentos (principalmente cámaras y detectores atmosféricos) dirigidos por investigadores del IAA-CSIC. Esta larga tradición de colaboración en nuevos desarrollos se remonta a 3 décadas, y convierte al IAA-CSIC en el aliado perfecto para CAHA.

Los telescopios de Calar Alto han contado desde sus inicios con una instrumentación puntera que ha permitido el desarrollo de proyectos en todas las áreas

de la Astronomía. Más de 30 instrumentos se han instalado en los diferentes telescopios de Calar Alto a lo largo de su historia: cámaras y espectrógrafos de diferentes resoluciones angulares y espectrales, trabajando a longitudes de onda visibles e infrarrojas. La tabla 1 muestra la lista completa de la instrumentación pasada y presente del observatorio.

Además de la instrumentación astronómica anteriormente mencionada, Calar Alto cuenta también con una colección de pequeñas instalaciones dedicadas a medir la calidad del cielo nocturno: cada noche se ponen en funcionamiento monitores de seeing, extinción, brillo del cielo y polvo, que proporcionan información sobre la calidad de la noche en tiempo real. Esto se complementa con una completa estación meteorológica, en funcionamiento desde 1998, que registra los valores de diferentes parámetros hasta dos veces por minuto (todos los datos atmosféricos y meteorológicos pueden ser consultados desde la página web de Calar Alto, y desde la aplicación Android MeteoCAHA).

Estas instalaciones, que funcionan cada noche en Calar Alto, han hecho posible realizar una caracterización completa del cielo, concluyendo que los

Figura 2. Skyline de CAHA.



valores promedio de algunos parámetros (seeing $\sim 0.85''$, extinción ~ 0.152 mag/AM, brillo del cielo en V ~ 21.43 mag/arcsec², entre otros) han permanecido estables durante la última década, lo que confirma la excelente calidad del cielo en Calar Alto.

Por su condición de ICTS, Calar Alto ofrece un mínimo del 20% del tiempo de observación de los telescopios de 2.2 m y 3.5 m para realizar propuestas seleccionadas en convocatorias competitivas que se anuncian de forma semestral a la comunidad española. Además, un número de noches que oscila entre 5 y 10 cada semestre se ofrece a propuestas seleccionadas en las convocatorias competitivas de la red europea OPTICON-Radionet PILOT (ORP). Pero el plato fuerte del reparto del tiempo de observación de los telescopios de 2.2 m y 3.5 m corresponde a grandes proyectos internacionales, que requieren una gran cantidad de noches de observación a lo largo de varios años. La tabla 2 muestra los diferentes proyectos de larga duración que se han venido desarrollando en el observatorio de Calar Alto en los últimos años. El desarrollo de este tipo de programas es posible gracias a la dedicación y experiencia de la plantilla de Calar Alto, que posibilitan la realización de observaciones en modo servicio con una

alta eficiencia que se traduce en un porcentaje de tiempo de observación perdido debido a problemas técnicos inferior al 3%.

El telescopio de 1.23 m no está incluido en la ICTS, y dedica parte de su tiempo a actividades educativas y divulgativas, incluyendo actividades de colaboración entre aficionados y profesionales, articuladas a través de la red Europlanet.

El telescopio Schmidt, tampoco incluido en la ICTS, está sujeto a un acuerdo con la Agencia Espacial Europea cuyo objetivo es el estudio de objetos cercanos a la Tierra (NEOs).

La evolución del tipo de proyectos que se han desarrollado en Calar Alto, se ha visto reflejada también en los hitos científicos obtenidos con sus telescopios. Desde los inicios de los años 80 Calar Alto ha contribuido, por mencionar algunos de sus trabajos más citados, al desarrollo de catálogos de Novas Galácticas, de Núcleos Galácticos Activos, y de estrellas O Galácticas; también al desarrollo de librerías estelares para calibrar el triplete del Calcio; al estudio de la morfología de galaxias tempranas masivas, de chorros en





Figura 3. Vista aérea del complejo.

estrellas jóvenes, de discos circunestelares, de estrellas T-Tauri y Wolf-Rayet; además de a los descubrimientos de nuevas enanas marrones jóvenes y de la existencia de galaxias extremadamente compactas. Pero quizás uno de los resultados con mayor impacto en los medios de comunicación fue la observación del impacto del cometa Shoemaker-Levy 9 contra Júpiter, en julio de 1994: las imágenes obtenidas desde Calar Alto fueron las primeras que se tomaron de este evento desde un observatorio terrestre.

La aprobación de las propuestas de observación de larga duración, sustentadas por grandes equipos

científicos internacionales, ha propiciado que una buena parte de los resultados científicos de calado estén asociados a ellas. Los primeros proyectos de este tipo desarrollados en Calar Alto, CADIS y ALHAMBRA, se centraron en el estudio de la evolución cósmica y de la detección de galaxias a alto desplazamiento al rojo. Posteriormente, gracias al proyecto de legado CALIFA, que se dedicó a observar más de 600 galaxias del Universo local se pudo confirmar que las galaxias se forman desde dentro hacia fuera. Más recientemente, el proyecto de legado CAVITY, dedicado a estudiar galaxias en vacíos, ha mostrado que estas galaxias evolucionan más despacio que en otros entornos más poblados. También de carác-

ter extragaláctico, el proyecto Bhole está centrado en el estudio de la masa de los agujeros negros centrales de las galaxias. Y en el ámbito estelar y planetario destacan los proyectos de legado CARMENES Legacy+ y KOBE, cuyos objetivos principales son la búsqueda de exoplanetas alrededor de estrellas de tipo M y K respectivamente, utilizando el espectrógrafo de altísima resolución CARMENES. Gracias a este innovador instrumento se han descubierto ya más de 60 exoplanetas desde Calar Alto, lo que ha llevado al observatorio a las cotas de popularidad más altas de su historia reciente.

Entre las principales fortalezas del centro cabe destacar la alta productividad científica asociada a los datos de Calar Alto: en los últimos 20 años los datos obtenidos con los telescopios de Calar Alto han contribuido a más de 2000 publicaciones científicas de impacto, un promedio de más de 100 publicaciones anuales; de las que 122 corresponden a 2022, siendo el mejor registro de su serie histórica.

Los nuevos retos de la Astrofísica conllevan la necesidad de crear nuevos desarrollos tecnológicos que proporcionen respuestas a las preguntas que continuamente se plantean en la comunidad científica, y Calar Alto no es ajeno a ello. Por este motivo, el observatorio está inmerso en dos proyectos instrumentales que recientemente han iniciado su andadura: por un lado el espectrógrafo de campo integral TARSIS (*Tetra-ARmed Super-lfu Spectrograph*) para el telescopio de 3.5 m, ya descrito en un número anterior de este boletín, y cuyos puntos fuertes son su gran campo de visión (aproximadamente 9 veces más amplio que el de su predecesor en Calar Alto PMAS/PPAK), y su capacidad para observar a longitudes de onda en el ultravioleta cercano; y por otro lado, el proyecto MARCOT (*Multi-Array of Combined Telescopes*), una infraestructura astronómica modular, para espectroscopía de alta resolución e imagen de gran campo con gran rango dinámico y con resolución espacial por debajo de un segundo de arco. El objetivo principal de este original proyecto es el diseño conceptual y el desarrollo de un plan para la construcción de un telescopio de gran apertura efectiva a bajo coste utilizando telescopios de pequeña apertura (~40 cm).

El papel cada vez más presente de la ciencia entre la sociedad motiva también parte de la acti-

vidad de Calar Alto. Con el fin de dar a conocer sus instalaciones entre el gran público, y en virtud de un acuerdo con la compañía Azimuth, el observatorio abre sus puertas de forma regular a visitas guiadas (incluyendo visitas de carácter inclusivo con ONCE, Downgranada y el proyecto AMANAR), y a sesiones de observación en las que se utilizan tanto pequeños telescopios aficionados como también el telescopio de 1.23 m. No en vano, este último es el mayor telescopio en el continente europeo que ofrece la posibilidad de observar a través de un ocular, lo que ejerce una gran fascinación entre el público que tiene la oportunidad de disfrutarlo.

Además, Calar Alto muestra un compromiso con el fomento de la cantera de nuevas vocaciones en el campo de la Astronomía: así, estudiantes de diferentes universidades europeas disfrutan cada año de la oportunidad de poder realizar sus prácticas observando en las mismas condiciones que sus colegas profesionales, utilizando los telescopios de 2.2 m y 1.23 m.

No podemos dejar de mencionar la decidida apuesta de Calar Alto por una Astronomía sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Entre los años 2018 y 2022 se desarrolló un proyecto denominado "Isla energética" (financiado con fondos FEDER), con el objetivo principal de minimizar en la medida de lo posible la huella de carbono del observatorio. Este esfuerzo se materializó en la adquisición de varios coches eléctricos, y en la instalación de una caldera de biomasa y de un parque fotovoltaico, que han satisfecho los objetivos previstos al inicio del proyecto.

Finalizamos este recorrido por la historia del observatorio resaltando que en 50 años Calar Alto ha pasado de ser un cerro frecuentado por pastores, a albergar el mayor complejo observacional de Astronomía en el rango visible e infrarrojo cercano de la Europa continental, atrayendo talento y desarrollo sostenible a la provincia de Almería. Asegurar que seguirá siendo así requerirá el impulso de la población local y de sus representantes a una ley de protección del cielo efectiva, que mediante una regulación más racional y razonable de la iluminación nocturna permita que el cielo de Calar Alto siga siendo una fuente de descubrimientos astronómicos de primera línea durante los próximos 50 años.

Instrumento	Telescopio/foco	Inicio	Fin	Modo	Rango
Cámara fotográfica Zeiss	1.23 m Cassegrain	1976	1980	Imagen	Visible
Espectrógrafo Nasmyth	1.23 m Nasmyth	1976	1986	Espectroscopía	Vis.
Tubo transformador de imágenes	1.23 m Cass.	1976	1980	Ima.	IR
Fotómetro UBVR1	1.23 m/2.2 m Cass.	1977	1995	Fotometría	Vis.
Espectrógrafo Coudé	2.2 m Coudé	1979	1995	Espec.	Vis
Cámara foto. Zeiss	2.2 m Cass.	1979	1984	Ima.	Vis.
Fotómetro UBVR1/Polarímetro	1.23 m/2.2 m Cass.	1979	1995	Fotom./Polarimetría	Vis.
Espectrógrafo Cassegrain	2.2 m Cass.	1979	2000	Espec.	Vis.
Cámara foto. Schmidt	Schmidt	1980	2000	Ima.	Vis.
Polarímetro IR	1.23 m/2.2 m Cass.	1982	1995	Polar.	IR
Interf. Speckle IR	1.23 m/2.2 m Cass.	1983	1995	Interferometría	IR
Cámara foto. Zeiss	3.5 m Cass.	1984	1986	Ima.	Vis.
Cámara foto. Zeiss	3.5 m Primario	1984	1991	Ima.	Vis.
Espectrógrafo Cassegrain	3.5 m Cass.	1986	1989	Espec.	Vis.
TWIN	3.5 m Cass	1988	2015	Espec.	Vis.
Cámara CCD	1.23 m/2.2 m Cass.	1990	2012	Ima.	Vis.
Cámara IR	3.5 m Cass.	1990	1992	Ima.	IR
Blue/Black MAGIC	1.23 m/2.2 m/3.5 m Cass.	1993	2005	Ima.	IR
OMEGA prime	3.5 m Prim.	1996	2003	Ima.	IR
MOSCA	3.5 m Cass.	1996	2015	Ima./Espec.	Vis.
ALFA	3.5 m Cass.	1996	2007	Óptica Adaptativa	
CAFOS	2.2 m Cass.	1997	-	Ima./Espec./Polar.	Vis.
OMEGA Cass	3.5 m Cass.	1998	2008	Ima/Espec.	IR
BUSCA	2.2 m Cass.	1998	2023	Ima.	Vis.
FOCES	2.2 m Cass.	1998	2009	Espec.	Vis.
LAICA	3.5 m Prim.	2001	2018	Ima.	Vis.
PMAS	3.5 m Cass.	2002	-	Espec.	Vis.
OMEGA2000	3.5 m Prim.	2003	-	Ima.	IR
AstraLux	2.2 m Cass.	2006	-	Ima.	Vis.
PANIC	2.2 m Cass.	2011	-	Ima.	IR
CAFÉ	2.2 m Cass.	2011	-	Espec.	Vis.
Cámara CCD DLR	1.23 m Cass.	2013	-	Ima.	Vis.
Cámara CCD	Schmidt	2015	-	Ima.	Vis.
CARMENES	3.5 m Cass	2016	-	Espec.	Vis./IR
Cámara CCD DLR	1.23 m Cass.	2023	-	Ima.	Vis.
Cámara CMOS	1.23 m Cass.	2023	-	Ima.	Vis.

Tabla 1 (página de la izquierda): Listado de los instrumentos que se han instalado en los telescopios de Calar Alto desde sus inicios hasta la actualidad: (1) Nombre o denominación del instrumento; (2) Telescopio/foco en el que se instaló; (3) Año de inicio; (4) Año de fin; (5) Modo de observación; (6) Rango de funcionamiento.

Tabla 2 (abajo): Lista de programas de larga duración desarrollados en los telescopios de Calar Alto: (1) Nombre; (2) Año de inicio; (3) Año de fin; (4) Telescopio e instrumento(s) utilizado(s).

Proyecto	Inicio	Fin	Instrumento/Telescopio
CADIS (Calar Alto Deep Imaging Survey)	1995	2000	CAFOS/2.2 m MOSCA/3.5 m OMEGA Prime/3.5 m
ALHAMBRA (Advanced Large, Homogeneous Area Medium Band Redshift Astronomical Survey)	2004	2011	LAICA/3.5 m OMEGA2000/3.5 m
CALIFA (Calar Alto Integral Field Area survey)	2010	2015	PMAS/3.5 m
BHOLE (Black hole – HOst Lifecycle Evolution)	2017	-	CAFOS/2.2 m
CARMENES Legacy+ ^(*) (Calar Alto high-Resolution search for M-dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Echelle Spectrographs)	2021	-	CARMENES/3.5 m
KOBE (K-dwarfs Orbiting By habitable Exoplanets)	2021	-	CARMENES/3.5 m
CAVITY (Calar Alto Void Integral-field Treasury survey)	2021	-	PMAS/3.5 m

(*) Entre los años 2016 y 2020, se llevó a cabo la explotación del tiempo garantizado del proyecto CARMENES; y fue en 2021 cuando comenzó el proyecto de legado CARMENES Legacy+.

LA MISIÓN ESPACIAL HERD

HERD es una misión científica propuesta para la Estación Espacial China (CSS) cuyo objetivo es abordar el estudio de diversos tópicos de física fundamental realizando medidas precisas de los rayos cósmicos hasta energías superiores a 1 PeV y proporcionar una monitorización continua del cielo mediante la medida de rayos gamma con energías por encima de 100 MeV. Los equipos de CIEMAT, ICCUB e IFAE tienen una participación destacada en este proyecto.



Jorge Casaus

Centro de Investigaciones Energéticas,
Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)
jorge.casaus@ciemat.es

David Gascón

Institut de Ciències del Cosmos
de la Universitat de Barcelona (ICCUB)
david.gascon@icc.ub.edu

Javier Rico

Institut de Física d'Altes Energies (IFAE)
jrico@ifae.es

La plataforma de detección de radiación cósmica de alta energía HERD (*High Energy cosmic Radiation Detection facility*) (<http://herd.ihep.ac.cn/>) es un detector de partículas propuesto para ser instalado en la Estación Espacial China (CSS, *China Space Station*) en 2027 y estar en operación durante al menos 10 años.

El objetivo de HERD es el estudio de diversos tópicos de física fundamental tales como la naturaleza de la materia oscura mediante la medida precisa del espectro energético y composición de los rayos cósmicos hasta energías superiores a la *rodilla* del espectro ($\sim 10^{15}$ eV) y proporcionar una monitorización continua del cielo mediante la medida de rayos gamma de energías a partir de los 100 MeV.

La colaboración científica HERD está compuesta por 30 institutos de investigación y universidades de China, Italia, España y Suiza, y cuenta con la participación de más de 200 físicos e ingenieros con una dilatada experiencia en el diseño, simulación, construcción y operación de los instrumentos espaciales más avanzados en este campo, en particular, en espectrómetros magnéticos espaciales PAMELA y AMS-02 y de los detectores calorimétricos DAMPE y CALET. La participación española en HERD está liderada por los grupos del CIEMAT, ICCUB e IFAE con la participación de 20 físicos e ingenieros.

La aportación tecnológica española a HERD se centra en el desarrollo de la electrónica de lectura y disparo de los principales subsistemas del instrumento. Los desarrollos bajo la responsabilidad de los institutos españoles son esenciales tanto para alcanzar los objetivos científicos principales de la misión (la medida del espectro y composición de los rayos cósmicos de alta energía), como para incrementar su impacto científico (a través de la detección y medida precisa de rayos gamma de alta energía).

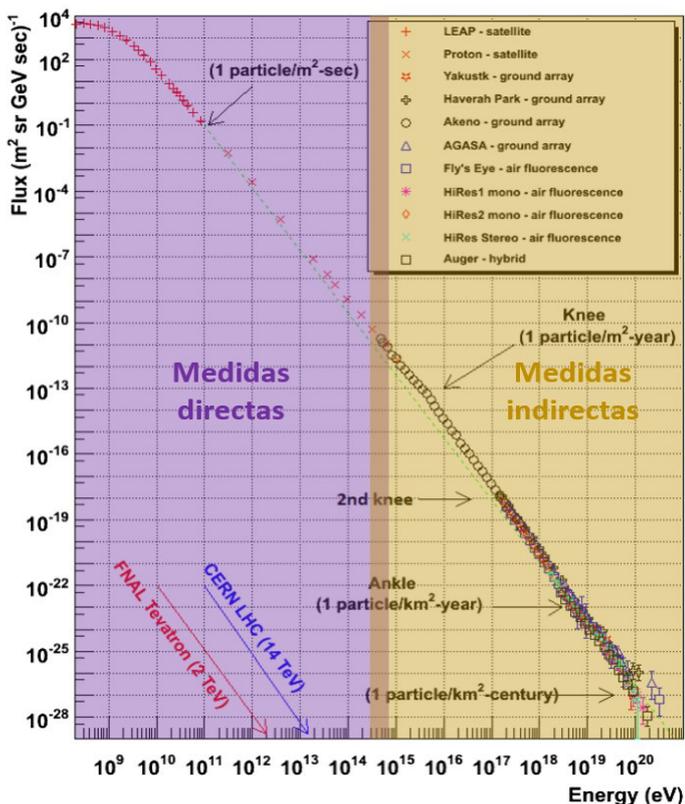
LA RADIACIÓN CÓSMICA

La atmósfera terrestre está permanentemente bombardeada por partículas elementales y núcleos atómicos con energías que abarcan más de 12 órdenes de magnitud, desde las menos energéticas, con unos pocos cientos de MeV hasta las partículas con la mayor energía observada, con energías del orden de 10^{12} GeV.

Los rayos cósmicos son partículas cargadas, esencialmente núcleos atómicos (98%) y electrones (2%). La componente nuclear está constituida principalmente por protones (~87%), helio (~12%) y núcleos más pesados (~1%). También se observa una pequeña fracción de antimateria (positrones y antiprotones) cuyo origen se cree que es secundario, es decir, producto de las interacciones de los rayos cósmicos primarios con el gas interestelar. Las partículas neutras de la radiación consisten en rayos gamma, neutrinos y antineutrinos.

Los rayos cósmicos son una muestra genuina de materia de origen fundamentalmente galáctico. La abundancia relativa de los diferentes elementos en los rayos cósmicos es similar a la que se encuentra en el sistema solar. Este hecho sugiere un origen común para todos ellos, a saber: la fusión de núcleos ligeros en el interior de las estrellas.

Espectro energético de los rayos cósmicos. El rango energético de la radiación cósmica se extiende más de 12 órdenes de magnitud en energía y 30 órdenes de magnitud en intensidad. El flujo, en términos de la cantidad de partículas por unidad de superficie y tiempo, determina la estrategia de detección y medida.



La característica más relevante del espectro energético de los rayos cósmicos es la existencia de dos cambios en el exponente de la ley de potencias que lo describe o índice espectral. A energías de unos 10^{15} eV, en la llamada *rodilla* del espectro, el índice espectral aumenta de 2.7 a 3, para retomar un valor de 2.7 a energías superiores a 10^{19} eV, en el llamado *tobillo* del espectro. Esta acusada dependencia energética conlleva que la intensidad de los rayos cósmicos varíe en más de 30 órdenes de magnitud a lo largo de su rango energético y determina las técnicas utilizadas para su medida.

A energías inferiores a la rodilla, el flujo de rayos cósmicos es suficientemente alto como para permitir detectarlos y medir sus propiedades directamente mediante instrumentos situados en plataformas espaciales o en globos estratosféricos. Por encima de la rodilla la detección directa requeriría el uso de instrumentos con áreas de colección tan grandes que resultan inviables para su construcción y operación en espacio. A energías más altas se utilizan métodos indirectos de detección que hacen uso de detectores extensos colocados en la superficie terrestre para detectar y medir las propiedades de las partículas de las cascadas atmosféricas producidas por los rayos cósmicos.

La medida precisa de las propiedades de los rayos cósmicos a todas las energías permitirá identificar el origen de las estructuras observadas en su espectro energético, que se cree contienen información sobre los diferentes posibles orígenes y los mecanismos mediante los que son acelerados y se propagan en el cosmos.

Actualmente las medidas directas de rayos cósmicos están limitadas a energías por debajo de la rodilla del espectro. La extensión de las medidas directas hasta energías de 10^{15} eV permitirá realizar estudios precisos de la composición y la estructura de la rodilla y avanzar enormemente en la comprensión de los rayos cósmicos galácticos.

La potencialidad de las medidas directas gracias a instrumentos precisos instalados en plataformas espaciales puede ilustrarse con las medidas recientes obtenidas por el espectrómetro magnético AMS-02 que opera en la Estación Espacial Internacional

(ISS) desde 2011. Las medidas de los flujos de las especies individuales de rayos cósmicos hasta energías de unos pocos TeV han revelado estructuras en sus espectros energéticos que no han podido ser reconciliadas con los modelos actuales para la producción y propagación de los rayos cósmicos galácticos. Por ejemplo, las estructuras observadas en los espectros de positrones y electrones requieren la inclusión de fuentes primarias de estas partículas no contempladas en los modelos actuales, ya sean de origen astrofísico, como pulsares, o los productos de la aniquilación de partículas de materia oscura en el halo galáctico.

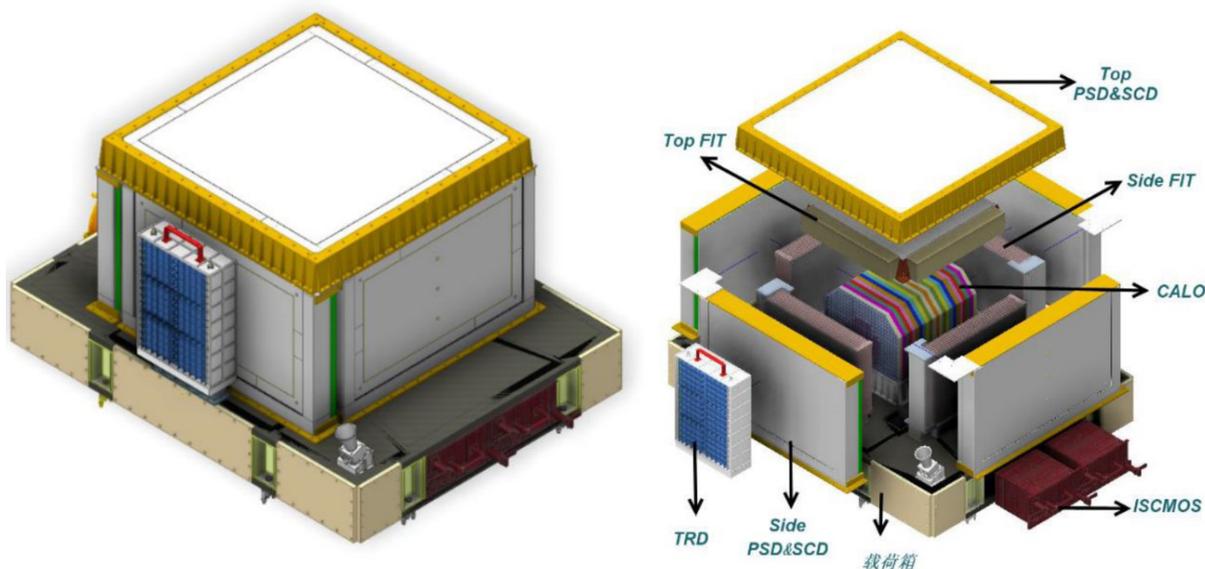
Sin embargo, los resultados experimentales actuales están limitados por la cantidad de partículas detectadas así como por el rango energético alcanzado. Para realizar una mejora cualitativa en la medida directa de los rayos cósmicos es necesario un nuevo instrumento que permita un aumento significativo en la exposición a la radiación cósmica. Este es el objetivo principal de HERD.

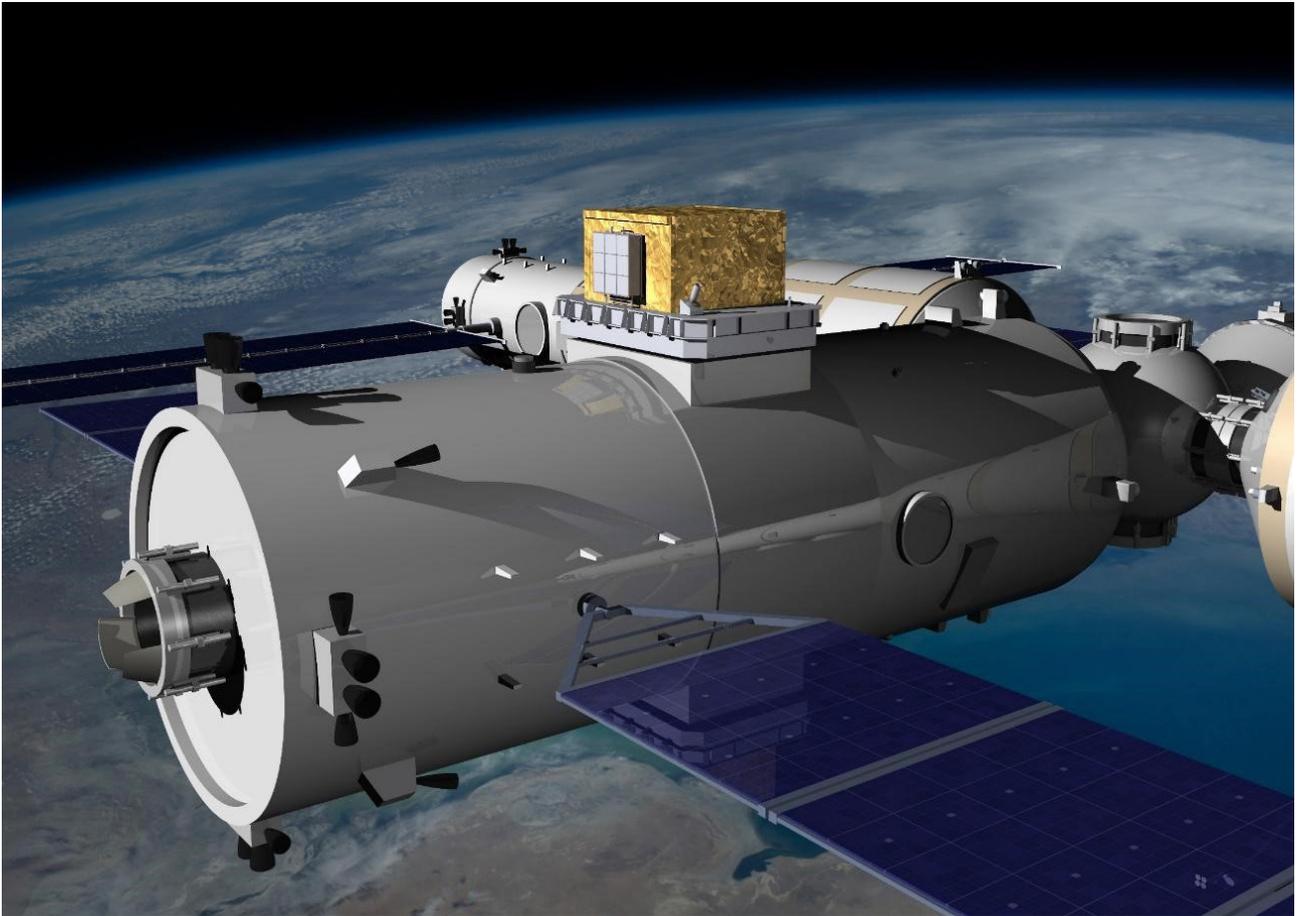
Además, dentro de la radiación cósmica, los rayos gamma constituyen una pequeña fracción en cuanto a su intensidad, pero de gran relevancia ya que, gracias a su carácter neutro, mantienen su trayectoria de origen, lo que permite realizar observaciones de objetos astronómicos y estudiar los fenómenos astrofísicos de más alta energía.

De igual modo que los rayos cósmicos, los rayos gamma interactúan en la atmósfera produciendo cascadas puramente electromagnéticas que, para energías por encima de unas pocas decenas de GeV, pueden ser detectadas en tierra mediante instrumentos especializados como los telescopios de rayos gamma MAGIC y el primer gran telescopio del futuro Cherenkov Telescope Array (CTA), el LST-1, ambos actualmente en operación en el Observatorio del Roque de los Muchachos en La Palma.

A energías por debajo de pocos centenares de GeV, el flujo de rayos gamma es suficientemente alto como para que los instrumentos espaciales

Esquema de HERD. Todos los servicios y la mayor parte de los componentes electrónicos del instrumento están ubicados en el plano inferior para maximizar el campo de visión del instrumento. La vista ampliada muestra los principales subsistemas de HERD.





Vista de HERD en la CSS. Ilustración de HERD ubicado en la parte superior de módulo multipropósito de la estación espacial china CSS. La CSS proporciona todos los servicios necesarios para HERD, incluyendo la potencia eléctrica, el circuito de refrigeración para la electrónica, así como la telemetría requerida para el control y monitorización y la transmisión de los datos científicos.

puedan detectarlos directamente y medir con precisión su dirección y energía utilizando las mismas técnicas experimentales que para la medida de rayos cósmicos.

Gracias a su gran campo de visión, HERD proporcionará una monitorización continua del cielo con observaciones que complementarán las de detectores de rayos gamma de muy alta energía en tierra (LHASSO, CTA), así como las de ondas gravitacionales (Virgo, LIGO) y neutrinos de alta energía (Ice-Cube, Km3NeT), durante el próximo decenio, en el contexto de la nueva astronomía multi-mensajero.

EL DETECTOR HERD

El detector central de HERD es un calorímetro (CALO) que proporciona la identificación y medida precisa de la energía de los rayos cósmicos incidentes. Rodeando al calorímetro se encuentra el detector de trazas (FIT) para la medida precisa de la trayectoria de las partículas cargadas, el detector de plástico de centelleo (PSD), que permite la identificación de los rayos gamma, y un detector de carga (SCD) que proporciona la medida del valor absoluto de la carga eléctrica de la partícula incidente. En un lateral, el detector de radiación de transición (TRD) permite la calibración en la medida de la energía del CALO.

El diseño de HERD se basa en la experiencia acumulada en detectores espaciales de radiación cósmica de alta energía y en una intensa actividad de I+D para el desarrollo y validación de detectores calorimétricos isótropos altamente segmentados para aplicaciones espaciales que permite un aumento significativo del factor geométrico efectivo para la misma masa de la carga útil.

El concepto de HERD ha sido validado mediante simulaciones detalladas y extensas campañas de pruebas con haces de partículas de alta energía que han permitido evaluar con precisión las capacidades de cada uno de los subdetectores tanto individual como conjuntamente. En particular, se ha comprobado que la resolución en la medida de la energía y las capacidades de identificación de las partículas incidentes responden a los requisitos establecidos.

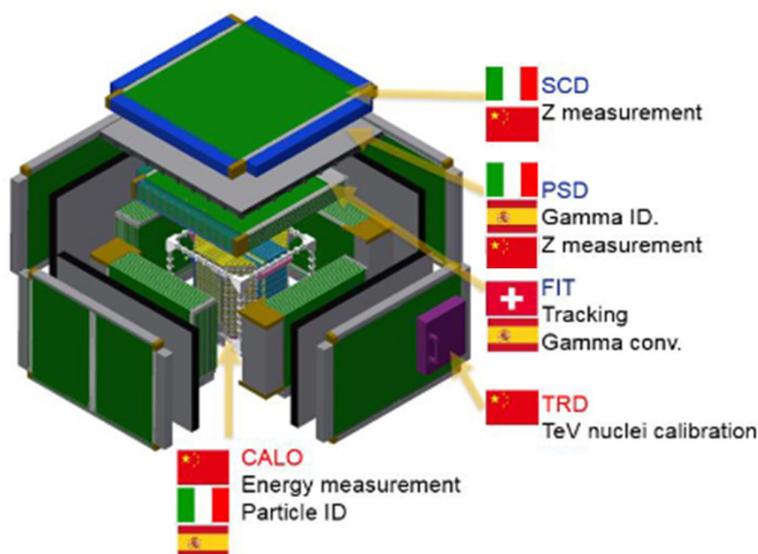
Basado en la validación proporcionada por los prototipos funcionales y el buen acuerdo con las simulaciones detalladas del instrumento, el diseño del modelo de vuelo de HERD, con unas dimensiones de 2.3 x 2.3 x 2.6 m³, una masa total de 4 toneladas, un consumo máximo de 1.2 kW, aumentará en más de un orden de magnitud el área efectiva de detección respecto a los instrumentos actuales, lo que permitirá extender el rango en la medida directa de las partículas de la radiación cósmica en más de un orden de magnitud y medir por primera vez con precisión la rodilla del espectro de los rayos cósmicos.

La CSS proporciona los recursos necesarios para la operación continua de HERD durante un periodo mínimo de 10 años incluyendo, además de la potencia eléctrica requerida por el instrumento, la infraestructura de refrigeración de la electrónica, así como la telemetría para el control y monitorización y la transmisión de los datos científicos, que se estima en 100 Mbps en promedio.

HERD se emplazará en la parte superior del nuevo módulo multifuncional de la CSS cuya instalación está prevista en la segunda mitad de esta década. HERD será integrado como carga útil en el interior de este módulo y, una vez completadas las operaciones de ensamblaje con el resto de la estación, será extraído con ayuda del brazo robótico de la CSS y depositado en la plataforma superior del módulo. Asimismo, el diseño de HERD permitirá, en caso de que fuera necesario a lo largo de su vida útil, realizar labores de mantenimiento mediante operaciones extravehiculares previstas en la CSS.

PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA EN HERD

Los grupos de astrofísica de partículas de CIEMAT, ICCUB e IFAE han identificado HERD como la misión que permitirá extender y complementar su programa experimental en física de rayos cósmicos y rayos gamma, y aplicar los desarrollos tecnológicos más recientes en detectores de física de partículas en un entorno espacial.



Participación Internacional en HERD. Ilustración de los principales sistemas de HERD en la que se muestra su funcionalidad y la participación internacional en su desarrollo. Los grupos españoles participan en el desarrollo de tres de los cuatro instrumentos de medida principales de HERD.

El CIEMAT inició en 2015 un programa de I+D para la próxima generación de detectores de rayos cósmicos espaciales, con el objetivo de desarrollar calorímetros isotrópicos para aplicaciones espaciales que pudieran proporcionar áreas efectivas superiores en un factor de 10 a las de los dispositivos actuales. Esto permitiría sondear las fuentes primarias de electrones y positrones más allá de los 10 TeV y, por primera vez, realizar un estudio preciso de la rodilla del espectro de los rayos cósmicos galácticos en el rango del PeV. En 2017, el CIEMAT se unió a HERD con el propósito de implementar las técnicas desarrolladas en el su programa de I+D. El CIEMAT desarrolla la electrónica de lectura y disparo del sistema de fotodiodos del calorímetro de HERD.

El ICCUB está desarrollando un circuito integrado de aplicación específica (o ASIC, de su definición en inglés "*Application Specific Integrated Circuit*"), denominado BETA para el FIT y el PSD que representa una contribución tecnológica clave para HERD. BETA es un ASIC diseñado para la lectura de fotomultiplicadores de silicio (SiPM), con bajo consumo, gran rango dinámico y con potencial uso en múltiples aplicaciones espaciales: sistemas de disparo y veto, medición de carga, calorimetría, conteo de fotones y contadores de tiempo de vuelo con resolución temporal moderada. De hecho, más allá del experimento HERD, BETA se utilizará para desarrollar una nueva versión del monitor de

radiación para la misión LISA de la ESA y se considera para diferentes misiones CubeSat.

La participación de IFAE se centra en optimizar el potencial científico de HERD como observatorio espacial de rayos gamma. Para ello, IFAE está desarrollando un sistema avanzado de disparo para rayos gamma, así como la electrónica de disparo del FIT y la electrónica de lectura y disparo del PSD. Gracias a la incorporación del sistema de disparo desarrollado en IFAE, se pretende reducir el umbral de detección de rayos gamma hasta 100 MeV, lo que convertirá a HERD en el instrumento de gran campo de visión más sensible dentro de su rango de energía durante su periodo de operación, y permitirá realizar observaciones complementarias a los telescopios terrestres y aumentar así sensiblemente el retorno científico de la misión.

La aportación tecnológica española en HERD se centra pues en el desarrollo de electrónica avanzada para los principales sistemas (CALO, FIT y PSD), y cubre toda la cadena de adquisición y disparo asociada.

Los desarrollos bajo responsabilidad de los grupos españoles son esenciales para alcanzar los objetivos científicos de la misión con rayos cósmicos de alta energía y permiten aumentar significativamente las capacidades de HERD para física de rayos gamma.

ASTRONET: DOS DÉCADAS DE COORDINACIÓN

ASTRONET es una iniciativa pan-europea de una serie de agencias financiadoras estatales y organizaciones europeas que, en colaboración con la comunidad científica, pretende proporcionar un mecanismo de planificación estratégica y coordinación para toda la astronomía europea. El objetivo es hacer frente a los retos actuales de la “gran ciencia” y garantizar que Europa siga siendo una potencia líder internacional en la investigación astronómica.



Jesús Gallego Maestro
Universidad Complutense de Madrid
jesusgm@ucm.es

El impulso para la creación de ASTRONET se originó en el reconocimiento de la creciente importancia de la astronomía en la investigación científica. A medida que la ciencia avanzaba y las tecnologías se volvían más complejas, la necesidad del apoyo coordinado internacionalmente a las instalaciones de vanguardia se hizo evidente. ASTRONET se estableció con el propósito de proporcionar una plataforma unificada que facilitara la coordinación y colaboración para la planificación y la gestión eficiente de las infraestructuras astronómicas presentes y futuras en Europa.

ORIGEN Y EVOLUCIÓN

Hace dos décadas, un grupo de astrónomos y científicos espaciales europeos se unió con la visión de fortalecer la investigación astronómica y el desarrollo de infraestructuras en Europa, persiguiendo un grado de coordinación internacional a nivel europeo que se pudiera comparar con los influyentes “Decadal Surveys” estadounidenses. El US Decadal Survey de Astronomía y Astrofísica es una revisión sobre astronomía y astrofísica que elabora aproximadamente cada diez años el Consejo Nacional de Investigación de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América. El informe examina el estado actual del campo, identifica las prioridades de investigación y formula recomendaciones para la próxima década. El Decadal Survey representa las recomendaciones de la comunidad investigadora a las agencias gubernamentales sobre cómo priorizar la financiación científica dentro de la astronomía y la astrofísica. El comité de redacción se nutre de paneles y subcomités temáticos, conferencias específicas y aportaciones directas de la comunidad que resumen el estado del arte en cada subdisciplina. El primer informe se publicó en 1964 y el informe más reciente, Astro2020, en 2021. Desde su concepción, ASTRONET no se concibió como una agencia financiadora, sino como un ejercicio de contrapartida europea a los US Decadal Surveys.

ESTRUCTURA Y COLABORACIÓN

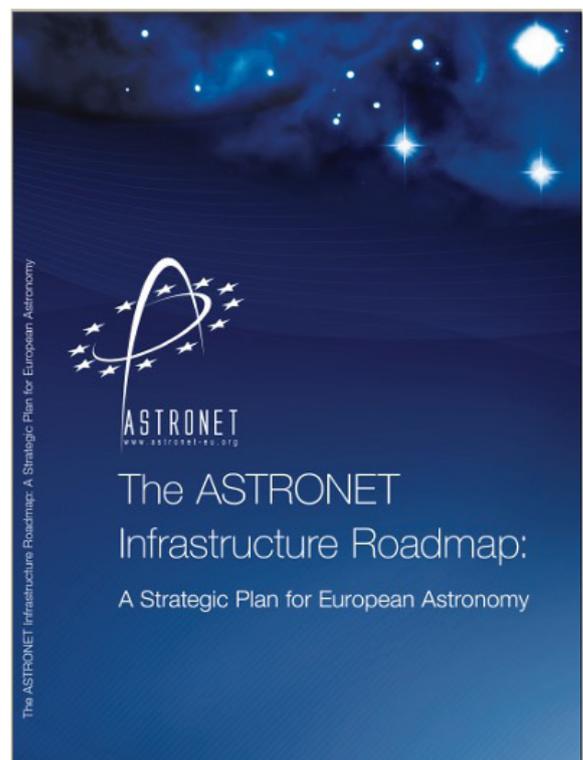
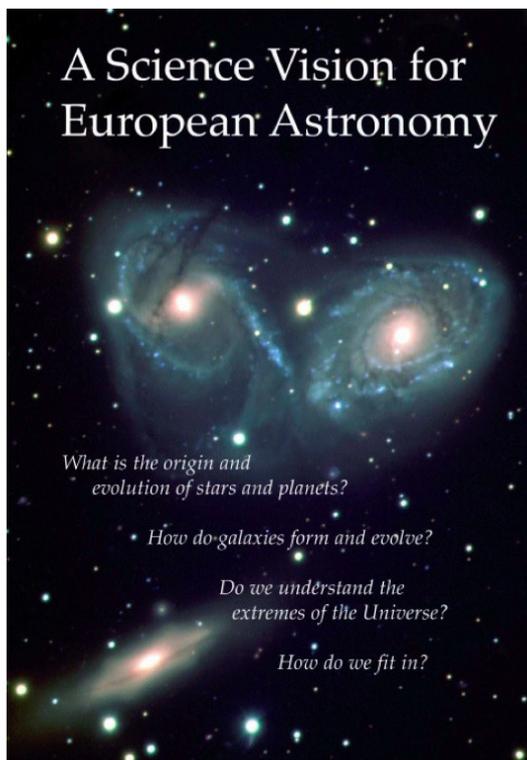
En septiembre de 2005, un grupo de científicos y representantes de agencias financiadoras europeas presentaron una propuesta de ERANET al programa marco FP6 europeo. El proyecto recibió una financiación de 2.5 millones de euros y se extendió hasta septiembre de 2009. Se crearon un Comité Ejecutivo coordinado por el representante francés

DE LA ASTRONOMÍA PARA EUROPA

(en su momento el prof. Jean-Marie Hameury), un Board coordinado por uno de los representantes gubernamentales (en su momento el prof. Johannes Andersen) y varios paquetes de trabajo. Los contratistas fueron STFC (UK), CNRS/INSU (Francia), INAF (Italia), NWO (Países Bajos), PT-DESY y BMBF (Alemania), NOTSA (Países Escandinavos), MICINN (España), NCBIR (Polonia) y la ESO. La Agencia Europea del Espacio (ESA) y casi todo el resto de los países europeos estuvieron involucrados mediante la figura de entidades asociadas.

España estuvo representada por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) y fue el prof. Xavier Barcons el que protagonizó la crucial participación en el impulso inicial hasta que al final de 2006 se nombró colaborador del MICINN al autor de este artículo para hacerse cargo desde entonces de coordinar todo lo relacionado con ASTRONET. En enero de 2009, ASTRONET se presentó en la reunión anual de la Red de Infraestructuras de Astronomía (RIA), y desde entonces hasta el momento actual, todo se ha gestionado en colaboración con el coordinador de la RIA.

Desde su lanzamiento, ASTRONET ha trabajado en la promoción y el desarrollo de la investigación astronómica en Europa, produciendo el equivalente europeo de los Decadal Surveys. Así nacieron el "ASTRONET Science Vision for European Astronomy" publicado en 2007 y el "ASTRONET Infrastructure Roadmap" publicado en noviembre de 2008, que establecía una hoja de ruta europea acorde al "Science Vision" para las grandes infraestructuras astronómicas. El "Science Vision" se gestó a partir de una recopilación de cuestiones científicas clave en la astronomía europea futura, aprovechando los estudios ya disponibles e intentando una contribución máxima de la comunidad a través de un equipo de trabajo de más de cincuenta científicos distribuidos en cuatro grandes paneles. Además se habilitaron foros de discusión pública en redes sociales y se organizó primero un Symposium internacional en Poitiers (Francia), en enero de 2007, y luego un segundo Symposium en Liverpool (Reino Unido) en junio de 2008. Los dos informes fueron el resultado de dos años de trabajo en el que la comunidad astronómica europea demostró una excelente capacidad de organización y coordinación.



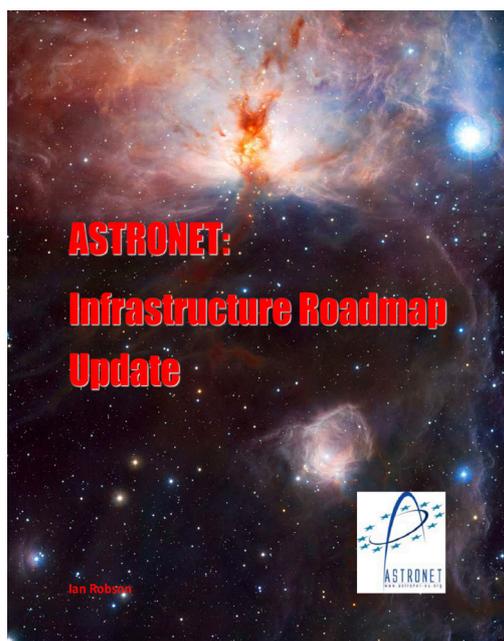
Los dos informes principales se acompañaron de toda una serie de estudios e informes complementarios que trataron temas como la optimización de las instalaciones astronómicas de tamaño medio (telescopios de 2-4 m), la optimización de las instalaciones astronómicas de gran tamaño (telescopios de 8-10 m), grupos de trabajo para apoyar el desarrollo de determinados instrumentos, un laboratorio astrofísico de software, o paneles de educación, divulgación y otros temas.

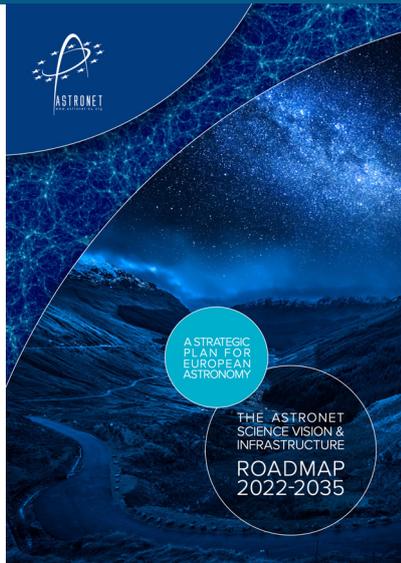
La ERANET inicial se prorrogó hasta diciembre de 2010 y luego se renovó con una nueva financiación europea proveniente del FP7, menos ambiciosa, que cubrió el período desde enero de 2011 hasta junio de 2015. Sobre la base de los logros iniciales, la segunda fase de ASTRONET abordó la implementación de la hoja de ruta. Los documentos "Science Vision" e "Infrastructure Roadmap" se renovaron y actualizaron de acuerdo con los planes a largo plazo de la ESO y la ESA. En febrero de 2013 se publicó un "Science Vision update" y en julio de 2014 se publicó un "Infrastructure Roadmap Update".

Con el paso del tiempo, los responsables de la toma de decisiones han ido adoptando diferentes medidas coincidiendo con las principales recomendaciones de ASTRONET. El Consejo de ESO ha lanzado el proyecto ELT (European Extremely Large Telescope) y la

ESA ha seleccionado las principales misiones. Los proyectos SKA (Square Kilometre Array) y CTA (Cherenkov Telescope Array) han tenido un comienzo firme. Las principales infraestructuras futuras para la Astronomía europea se han aprobado según lo deseado, algo incluso más notable teniendo en cuenta que, durante el mismo periodo, la recesión económica sometió a estrés a los presupuestos, los costes periódicos y la dotación de personal.

Desde 2015, ASTRONET es un grupo autosostenido de agencias financiadoras y organismos asociados. La organización opera como una red que conecta a diversas instituciones, agencias y centros de investigación que actúan en representación de los diferentes territorios de toda Europa. Se mantiene el Board y la figura del coordinador del mismo, así como una secretaría administrativa. En todos estos años, ASTRONET ha establecido colaboraciones sólidas con organizaciones nacionales e internacionales para garantizar la sinergia y la eficacia en la utilización de recursos. Su estructura jerárquica permite la participación de miembros de diferentes países, asegurando una representación equitativa y un enfoque verdaderamente pan-europeo. En el verano de 2023 el prof. Colin Vincent ha dejado su puesto de coordinador del Board, y el grupo se enfrenta a un proceso de renovación.





Contents

Executive Summary	
Introduction.....	6
Key recommendations.....	14
Introduction	
1. European Astronomy research and facilities.....	24
2. ASTRONET and its mission.....	26
3. 2008 Roadmap and progress since.....	27
4. Methodology of the current exercise.....	31
Panel Reports	
A. Computing; big data, HPC and data infrastructure.....	36
B. Origin and evolution of the Universe.....	50
C. Formation and evolution of galaxies.....	68
D. Formation and evolution of stars.....	86
E. Formation and evolution of planetary systems.....	100
F. Solar system and the conditions for life.....	112
G. Extreme astrophysics.....	124
H. Astronomy and society.....	140
Roadmap	
1. Overview of current and upcoming facilities.....	152
2. Integrated roadmap for 2020-2035.....	163
3. The future roadmap: beyond 2035.....	172
Appendices	
Appendix A: Panels membership.....	178
Appendix B: Acronyms and glossary.....	180

ASTRONET ROADMAP 2022-2035

“ASTRONET Science Vision and Infrastructure Roadmap 2022-2035” es la última hoja de ruta exhaustiva elaborada por ASTRONET. Se publicó el pasado mes de junio de 2023 y, como todos los informes, está disponible en la web oficial (https://www.astronet-eu.org/?page_id=521).

En esta ocasión más de cien científicos de toda Europa participaron en la elaboración del informe y se llevaron a cabo una serie de consultas públicas para garantizar que reflejara la amplitud de puntos de vista dentro de la astronomía. El esfuerzo global fue coordinado por el Reino Unido a través del STFC.

Los paneles establecieron cuestiones científicas clave, como la comprensión del origen del Universo y la evolución de los planetas de nuestro Sistema Solar, y formularon recomendaciones sobre las instalaciones y los recursos necesarios para satisfacer estas prioridades. El suministro continuo de investigadores altamente formados y motivados también será fundamental para el progreso y el compromiso de la sociedad.

Al formular sus recomendaciones, el informe complementa las visiones publicadas recientemente por la Agencia Espacial Europea, Estados Unidos y organismos asesores como APPEC para la Física de Astropartículas.

El objetivo del informe es crear un recurso de libre acceso para que los responsables políticos y científicos to-

men decisiones fundamentadas que orienten de forma más eficaz y eficiente los descubrimientos científicos.

ASTRONET: A PLANNING AND ADVISORY NETWORK FOR EUROPEAN ASTRONOMY

En breve se cumplirán dos décadas desde que aquel grupo original impulsara la iniciativa de ASTRONET. En este período de tiempo se han logrado avances extraordinarios en todas las áreas de la investigación astronómica, en gran parte como resultado de sólidas colaboraciones internacionales y del trabajo de las organizaciones intergubernamentales europeas ESO y ESA.

La influencia de ASTRONET se extiende más allá de la producción de informes estratégicos. La organización ha contribuido al fortalecimiento de la comunidad científica europea, consolidando la posición de Europa como un líder en la investigación astronómica.

La red ha dejado una impronta en la astronomía europea, principalmente con los documentos “Science Vision” e “Infrastructure Roadmap” como las bases para la coordinación; ha demostrado el éxito de llevar a cabo un abordaje combinado de abajo-arriba y de arriba-abajo; la interacción con todos los agentes implicados ha sido un logro de coordinación especialmente complejo. Lo que ahora espera la comunidad astronómica es la implementación de las recomendaciones de la hoja de ruta. Ello implica compromisos de acción a diferentes niveles a largo plazo. También, un enfoque flexible, individualizado y pragmático, que es el espíritu de ASTRONET. Todo ello será la tarea de las nuevas generaciones.

La red cósmica consta de inmensos vacíos, de nodos dentro de los cuales se forman cúmulos de galaxias, de filamentos que conectan los distintos nodos y de estructuras planares que separan los vacíos cósmicos del resto de estructuras. De forma análoga el cerebro humano se organiza en una red que podemos estudiar como una distribución de galaxias trazando la red cósmica. Esto permite desarrollar técnicas nuevas de estudios neurocientíficos.



Francisco Kitaura Joyanes
Universidad de La Laguna
fkitaura@ull.es

IP del proyecto COSMICBRAIN

Sabemos desde hace alrededor de un siglo que el universo se expande y además lo hace de forma acelerada. En su origen fue mucho más denso y caliente como nos muestra la huella impresa en el cielo en el fondo de radiación cósmica de microondas.

Todas las complejas estructuras que vemos hoy en día en la distribución de galaxias, se originaron a partir de unas pequeñas perturbaciones de densidad primordiales, probablemente causadas por fluctuaciones cuánticas en el universo temprano.

La caracterización de la red cósmica que forman las galaxias a distintos tiempos cósmicos nos aporta información acerca de cómo se generaron las estructuras y qué componentes del universo rigen su evolución para caracterizar la energía oscura y arrojar luz sobre la materia oscura que parece dominar la gravedad.

La red cósmica consta de inmensos vacíos que dependen también de la masa de los neutrinos y de la energía oscura, de nodos dentro de los cuales se forman cúmulos de galaxias, donde domina la materia oscura o alternativamente la gravedad modificada, de filamentos que conectan los distintos nodos y de estructuras planares que separan los vacíos cósmicos del resto de estructuras.

Resumiendo, el universo representa a gran escala un sistema que se ordena a sí mismo a partir de una configuración aleatoria por medio de una interacción dominada por la gravedad, pero modulada también por la energía oscura y otros componentes (bariones, neutrinos, radiación...).

De forma análoga el cerebro humano se organiza en una red llamada el conectoma en la que se producen intercambios de información entre nodos de la red. Los daños neurodegenerativos se reflejan en distorsiones en la estructura del conectoma y por tanto su caracterización resulta una de las tareas más importantes de la neurociencia.

La detección precoz de enfermedades neurodegenerativas puede ser muy beneficiosa para la atención temprana y así mitigar o retrasar los efectos perniciosos de dichas enfermedades. De forma complementaria al diagnóstico que se realiza en una consulta médica que estudian en base a una

serie de pruebas la respuesta cognitiva del paciente, se pueden realizar análisis funcionales y estructurales de las imágenes de resonancias magnéticas del cerebro del paciente.

Estas imágenes muestran patrones evidentes en caso de que la demencia esté avanzada, sin embargo, la detección precoz exige ser capaces de distinguir los más mínimos síntomas en circunstancias en que el médico no es capaz de ver de forma clara signos neurodegenerativos.

En la comunidad neurocientífica se estudian métodos capaces de clasificar la edad del cerebro y compararla con la edad biológica del paciente para detectar síntomas neurodegenerativos de forma precoz.

Los patrones del cerebro humano detectados con resonancias magnéticas se pueden clasificar en dos categorías, por un lado aquellas que muestran la estructura del cerebro humano en reposo, denominadas estructurales y aquellas que muestran la actividad del cerebro humano, llamadas funcionales.

En cualquiera de las imágenes, ya sea funcional o estructural, de pacientes sanos o con un estado muy

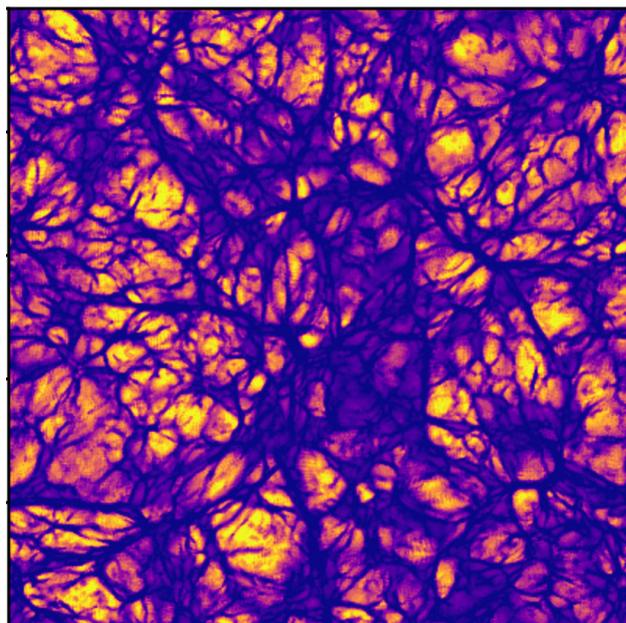
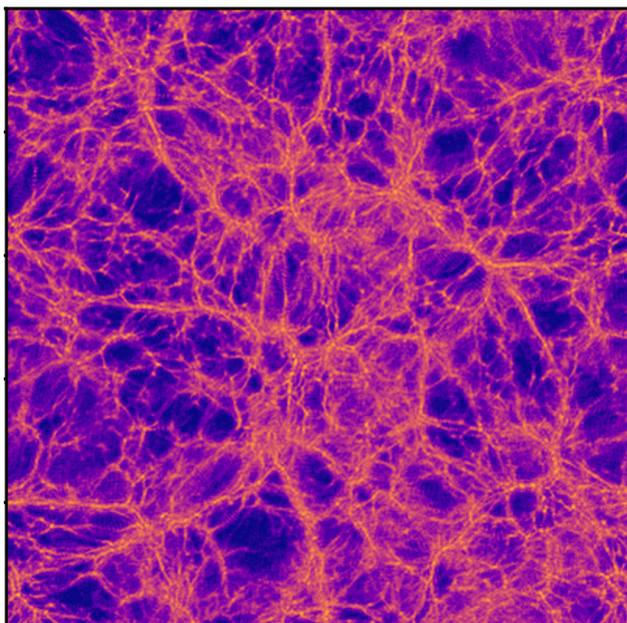
temprano neurodegenerativo es muy difícil detectar diferencias significativas a simple vista.

Los cartografiados del universo que se realizan con censos de galaxias masivos permiten medir los parámetros cosmológicos que gobiernan la evolución del universo. Este análisis es muy delicado dado que se hace en base a diferentes trazadores de la red cósmica dependiendo del tipo de galaxias y cubriendo un volumen con una máscara compleja dada por la estrategia de escaneado del cielo y profundidad en cada región determinada por los tiempos de exposición para la medición de espectros de galaxias con un espectrógrafo que permiten determinar el corrimiento al rojo y por tanto su distancia de acuerdo a los parámetros cosmológicos. Esto requiere técnicas estadísticas complejas capaces de distinguir patrones en estructuras organizadas frente a distribuciones aleatorias.

Siguiendo esta analogía podemos estudiar el conectoma humano como una distribución de galaxias trazando la red cósmica.

Para ello estamos desarrollando técnicas específicas en el grupo de biomedicina de IACTEC que incluye a neurocientíficos y a astrofísicos.

Red cósmica calculada con el código web-on que calcula el esqueleto de la red cósmica y la estructura de los vacíos cósmicos entre otras cosas (crédito: Francisco Kitaura).



TELEGRAMA A UN PLANETA: ¿HAY ALGUIEN AHÍ?

Imagina que pudieras ser la primera persona en contactar con una civilización alienígena. ¿Qué les dirías?

Una vez tengas pensado tu mensaje, ponlo en forma gráfica en un pictograma sobre una cuadrícula de 73x73 píxeles. No, no es nada fácil.

Pues esto es lo que ha logrado hacer el alumnado que ha participado en el concurso "Telegrama a un planeta", el primer concurso educativo para el envío de un mensaje a un exoplaneta potencialmente habitado.



Fernando J. Ballesteros

Observ. Astronòmic de la U. de València (OAUV)
fernando.ballesteros@uv.es

Juan Ángel Vaquerizo

Cooperation through Education in
Science and Astronomy Research (CESAR)
javaquerizo@isdefe.es

Beatriz Ramírez

beatriz.ramirez@ext.uv.es

Xusa Moya Lucas

M.Jesus.Moya@uv.es

Aula del Cel de l'OAUV

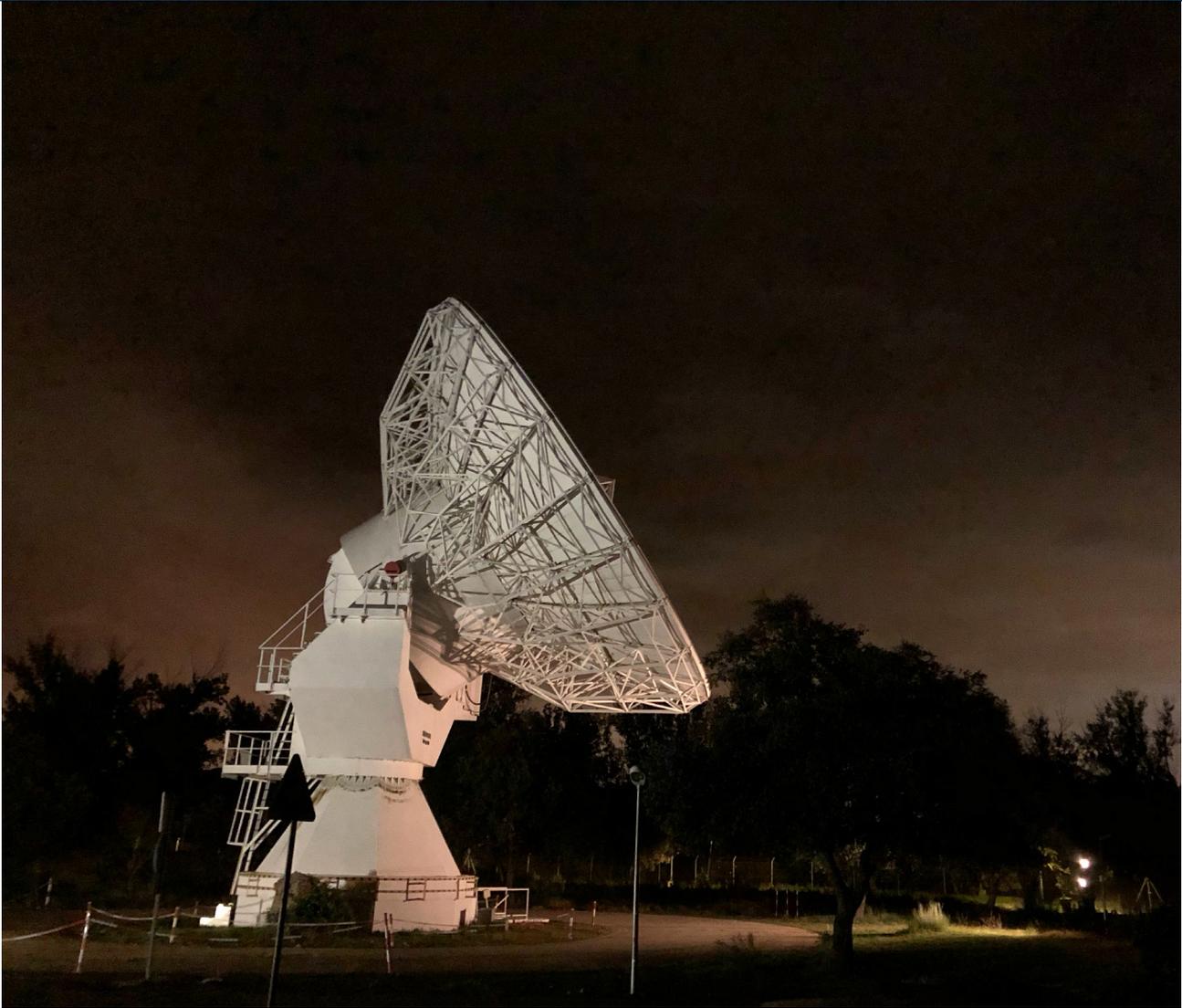
En nombre del equipo de Telegrama a un planeta

HISTORIA DE UNA SERENDIPIA

Esta aventura empezó como una propuesta de reportaje por parte de Pere Renom, director del programa de TV3 de divulgación científica "Quèquicom". Este programa se especializa en proponerse retos difíciles, como hacer arqueología de un naufragio, flotar ingravidos en un vuelo parabólico... y usar la experiencia para realizar divulgación de la ciencia. En esta ocasión el reto consistiría en enviar un mensaje con un radiotelescopio a una hipotética civilización extraterrestre, y rodar un reportaje sobre el desarrollo del proyecto.

Tras varios meses de intentos infructuosos de contactar con diferentes agencias, radiotelescopios y empresas de telecomunicaciones de diferentes partes del mundo, Pere finalmente contactó con el Observatori Astronòmic de la U. de València por sugerencia de Ignasi Ribas del IEEC (colaborador del programa) dado que en este centro ya se tenía cierta experiencia previa con la temática del METI (Messages to ExtraTerrestrial Intelligences); tal vez pudieran aportar algo más. Tras una (en este caso fructuosa) conversación con miembros del OAUV, pronto se vio que el proyecto de TV3 tenía un gran potencial educativo: ¿por qué no reconvertir la propuesta en un reto para estudiantes? Sería un tema fascinante para trabajar en clase: la astrobiología, el SETI, el METI, los exoplanetas, las civilizaciones alienígenas a la luz de la ciencia... y que fuera el propio alumnado quien diseñara el mensaje. ¿Con qué ideas innovadoras podrían sorprendernos? Incluso podría ser un concurso, y que fuera el mejor mensaje el que se radiara al exoplaneta. Además, una propuesta educativa sería mucho más fácil de poner en valor, y encajaba con la línea de trabajo del Aula del Cel, la entidad educativa del OAUV desde la que desarrolla su proyecto de enseñanza y didáctica de la astronomía para los centros educativos de la Comunidad Valenciana.

Con esta idea en la cabeza se contactó con la iniciativa educativa CESAR (Cooperation through Education in Science and Astronomy Research), un programa desarrollado por la ESA, el INTA y la empresa pública ISDEFE para proporcionar al alumnado de secundaria y de universidades europeas experiencia práctica en investigación astronómica. La propuesta de realizar un proyecto METI como programa educativo llegaba en el momento adecuado: la iniciativa CESAR



Una de las dos antenas que el INTA tiene en ESAC con las que se envió un Telegrama a un planeta (Foto. Pere Renom).

acababa justamente de firmar un acuerdo con el INTA para usar como recurso educativo dos antenas que este instituto tiene en ESAC, el Centro Europeo de Astronomía Espacial de la Agencia Espacial Europea (ESA) sito en la localidad de Villanueva de la Cañada, cerca de Madrid. Se trata de dos antenas de seguimiento y telecomando para misiones espaciales, que tienen por tanto capacidad para emitir una señal de radio. La propuesta fue muy bien recibida por parte de CESAR y se acordó proponérsela a su vez al equipo del INTA encargado de las antenas. La respuesta apenas tardó: también les encantaba el proyecto.

Con todos los agentes coincidiendo, sólo faltaba repartirse el trabajo: Desde el IEEC se propondría el exoplaneta destinatario del mensaje, desde el

Aula del Cel del OAUV y CESAR se elaboraría la [guía didáctica](#), y se coordinaría la difusión del proyecto y las inscripciones, el INTA enviaría finalmente el mensaje y TV3 realizaría un reportaje de todo ello, incluyendo una entrevista con la clase ganadora. Daba así comienzo el concurso educativo “Telegrama a un planeta” (nombre elegido porque era igual para –casi– todas las lenguas cooficiales del estado), un concurso destinado a centros de enseñanza de toda España a partir de 3º de ESO hasta 2º de Bachillerato, y grados básico y medio de Formación Profesional.

¿QUÉ MANDAR, CÓMO Y A QUIÉN?

Las antenas parabólicas que se usarían para “Telegrama a un planeta” trabajan en las bandas S y X de radio-

frecuencia. En concreto, para el concurso se utilizaría la banda S, una zona del espectro electromagnético de las ondas de radiofrecuencia comprendida entre los 2 y los 4 GHz de frecuencia. A fin de aumentar la intensidad de la señal, se emplearían simultáneamente las dos antenas para enviar el mensaje, aunque no en configuración de interferometría al no disponer de correlador para poner ambas antenas en fase, y sería además complicado configurar los transmisores de las antenas. De cualquier modo, dada la cercanía de ambas antenas (unos 300 metros de separación) y el bajo bit rate (1 bit/seg, ver más adelante), se consideró suficiente como para que la transmisión simultánea fuese efectiva (finalmente por motivos técnicos, para el primer envío sólo se usó una antena).

Desde el principio tuvimos claro que queríamos realmente mandar un mensaje y que tuviera visos de ser detectado (y a ser posible comprendido) por seres inteligentes. Esto implicaba buscar como destino un exoplaneta no sólo que estuviera lo bastante cerca como para que la señal enviada pudiera llegar con la suficiente intensidad como para oírse por encima del ruido de fondo, sino también que estuviera en la zona de habitabilidad de su estrella. Y por supuesto que la geometría Sol-Tierra-exoplaneta fuera la adecuada para su envío en las fechas en que queríamos mandar el mensaje, noviembre de 2023. Estos condicionantes llevaron a la elección (por parte de Ignasi Ribas) del exoplaneta Teegarden b como destinatario del mensaje.

En cuanto al formato del mensaje, se optó por un formato pictórico, un pictograma similar al radiomensaje de Arecibo o al Cosmic Call. Dado el tiempo limitado de uso de las antenas, el método óptimo de mandar un mensaje es mediante imágenes: un pictograma optimiza la cantidad de información que se puede enviar en poco tiempo, a la vez que aumenta la posibilidad de que sea más fácilmente comprensible si la inteligencia alienígena tiene unas capacidades visuales similares a las nuestras. Se preparó así una plantilla de 73x73 píxeles que el alumnado debía rellenar pintando algunos de sus recuadros y dejando otros vacíos, para componer la propuesta del aula del mensaje. Se pensó en este tamaño de plantilla porque es el cuadrado de un número primo e inicialmente estábamos pensando en mandar un mensaje a la Arecibo, donde parte del proceso de

decodificación consiste en “darse cuenta” de que llega un tren de pulsos cuya longitud es igual al producto de dos números primos.

Pero finalmente esto se volvió innecesario. El equipo de INTA propuso una novedosa estrategia de codificación del mensaje para su transmisión: asociar a cada columna de 73 píxeles del pictograma una frecuencia de la banda S empezando en 2030 MHz y desplazándose 200 KHz en cada píxel de la fila. De este modo, se llegaría hasta los 2044,6 MHz. El equipo técnico del INTA preparó el nuevo protocolo que transmitiría el mensaje utilizando las 73 frecuencias equidistantes e iría encendiendo y apagando la carrier (a la energía máxima del transmisor) para cada una de las frecuencias, según hubiera un cero o un uno en el pictograma. Con este protocolo, el pictograma se transmitiría “línea a línea”.

Esto proporcionaba una ventaja frente a métodos anteriores. Al asignar cada columna del pictograma a una frecuencia distinta, se estaba creando *de facto* una cuadrícula que permitiría a quien lo recibiera ir visualizando la imagen según fuera llegando, sin necesidad de tener que esperar a detectar todo el tren de pulsos para llegar al mágico número producto de dos primos. De hecho, no hacía falta usar números primos para nada. Además, una debilidad de los mensajes a la Arecibo es que si se pierde algún bit es imposible decodificar el mensaje, mientras que con este método, aunque se perdieran bits se podría llegar a reconstruir una imagen bastante fidedigna a la original.

Para favorecer que la civilización receptora identificara la existencia del mensaje, se decidió que antes y después del mensaje se haría un barrido desde la frecuencia más baja hasta la más alta para marcar el rango del mensaje. Esto representa una línea de píxeles negros como comienzo y como fin del mensaje. Además, se decidió añadir un píxel oscuro más, como comienzo y como fin de cada línea. De esta manera, el pictograma aparecería *de facto* en un recuadro de píxeles negros, convirtiéndose de modo efectivo en un pictograma de 75x75.

Para poder seguir la transmisión del mensaje, se decidió conectar a la transmisión de la antena un analizador espectral en modo espectrograma que permitiría ir viendo el mensaje según se iba transmitiendo. Se realizaron grabaciones previas de

los protocolos de transmisión con mensajes de prueba para comprobar que el pictograma test se veía correctamente y así se aseguraba el correcto visionado del pictograma real cuando se hiciera el envío con la clase ganadora como testigo.

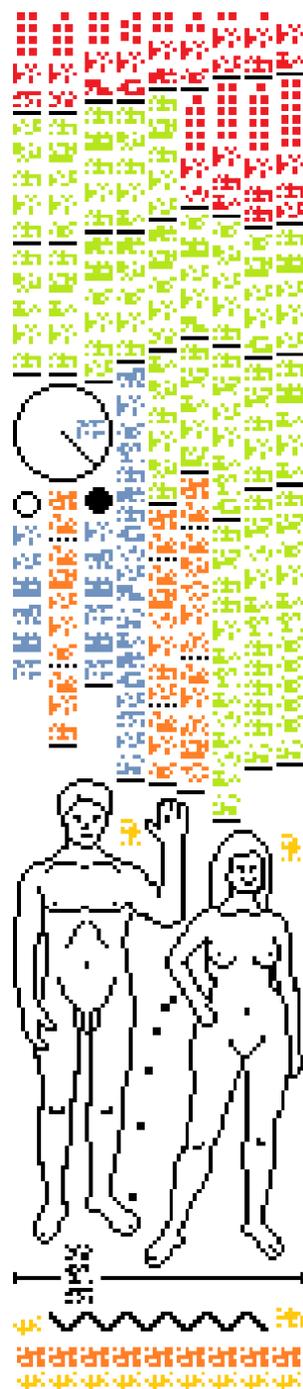
Todo este protocolo se configuró para ser realizado por el sistema de transmisión de manera automática a un bit rate de 1bit/seg. Este bit rate es muy bajo, pero de ese modo se aseguraba que la transmisión se realizaba de la manera más efectiva. Además, cuanto más lentos fueran los pulsos, más fáciles son de detectar sobre el ruido de fondo. De hecho es la misma estrategia que usamos cuando, en un entorno ruidoso o con mucha reverberación, nos ponemos a hablar lentamente. Para nuestro pictograma final de 75x75, tendríamos 5625 píxeles que transmitir, lo que se convierte en una duración de 93,75 minutos para enviar el pictograma ganador. Este envío además se repetiría varias veces a lo largo del periodo de visibilidad de Teegarden b, y además durante varios días, para incrementar la detectabilidad del mensaje y que para los teegardianos no quedara como otra anecdótica señal "Wow!" (la repetibilidad es uno de los principales requisitos exigidos a una posible señal SETI).

A iniciativa de Pere Renom, acordamos que tras el pictograma ganador se enviara un segundo mensaje para dotar de mayor contenido científico al mensaje. Sería una versión comprimida del Cosmic Call (que en este caso sería un pictograma limitado a un ancho de 73 píxeles para guardar coherencia con el tamaño del pictograma ganador) que nos preparó para la ocasión el astrónomo canadiense Yvan Dutil, uno de los autores del Cosmic Call original, tras varios intercambios de correos con Pere para asegurarse de que lo adaptara a nuestros requerimientos técnicos.

**UN MENSAJE MÁS ALLÁ. MÁS ALLÁ DEL MENSAJE:
UNA HERRAMIENTA EDUCATIVA.**

Plantearnos la posibilidad de poner al alumnado "al habla" con potenciales civilizaciones extraterrestres fue un momento similar a cuando se echa un puñado de maíz para palomitas en aceite hirviendo: tras unos instantes de asimilación y, por qué no decirlo, de estupefacción, surgió una explosión creciente e incesante de entusiasmo, ideas y oportunidades educativas de múltiples caras. La maquinaria didáctica se había puesto en marcha.

Mensaje compuesto por Yvan Dutil para enviarlo conjuntamente con el pictograma ganador del concurso Telegrama a un planeta. Rojo: definición de números. Verde: operadores matemáticos. Naranja: signo de interrogación y variables. Azul: geometría del círculo y definición de pi. Amarillo: las palabras "humano" (arriba) y "extraterrestre" (abajo). Parábola de puntos negros entre personas: dirección de la gravedad. Segmento: escala de tamaño. Onda: indica la comunicación (une los caracteres de "humano" y "extraterrestre"). El pictograma real es sólo en blanco y negro.



Desde el punto de vista educativo, enviar un mensaje a una hipotética civilización habitante de un exoplaneta a 12.5 años luz del nuestro iba a permitir, en primer lugar, familiarizar al alumnado con numerosos aspectos científico-tecnológicos entre los que podemos citar: las ciencias planetarias, la astrobiología, la física de la propagación de ondas, la química en el origen de la vida, la tecnología presente en un sistema de comunicación por radio, las matemáticas necesarias para representar en binario una cifra, un mensaje...

Pero la generación de oportunidades no se detuvo ahí. No sólo se trataba de entender las escalas del Universo, las condiciones idóneas para la generación de vida o la tecnología necesaria para hacer llegar un mensaje allá donde no alcanza la cobertura del móvil. No era un concurso meramente sobre astrobiología. El foco del concurso se había puesto precisamente en idear el contenido de dicho mensaje y esto pasaba obligatoriamente por hacerles reflexionar sobre aspectos lingüísticos tales como: el acto comunicativo, el lenguaje empleado (verbal/no verbal), las funciones predominantes y secundarias de éste (representativa, expresiva, apelativa...), la denotación y la connotación, el uso de los símbolos y la influencia de la cultura en su significado... Aspectos todos ellos que, aquí, en nuestra casa, en nuestro planeta Tierra, han estado sujetos a cambios de paradigma tras la aparición de nuevos canales como las redes sociales. Cambios que han dado lugar, en no pocas ocasiones, incluso a brechas comunicativas intergeneracionales. ¡Qué ambicioso reto éste que iba a plantear a nuestra juventud cómo hacerse entender, ya no con alguien de otra generación, sino de otro planeta, de otra civilización!

Y en lo referente a civilizaciones, se abría la siguiente generación de oportunidades: la del ser, la del conocer, la de las razones y los valores. A la hora de sopesar la elección de un mensaje iba a ser imprescindible hacer consideraciones culturales que nos iban a llevar a formularnos preguntas como: ¿Querría otra civilización saber de nuestra existencia? ¿Para qué? ¿Por qué surge una civilización? ¿Qué factores influyen en su evolución? ¿Y en su longevidad? ¿Cuándo y por qué ocurre un choque de civilizaciones? ¿Qué aspectos consideraríamos para decidir si una civilización es más avanzada que la nuestra?

De manera espontánea fueron surgiendo, una a una, todas estas facetas y, tal y como surgían, nos iban revelando paulatinamente un reto educativo de naturaleza genuinamente interdisciplinar. “Telegrama a un planeta” es una herramienta educativa a la medida de los nuevos currículums.

Pero en el diseño de una actividad educativa no todo son contenidos, no todo son saberes. Hay que conectar con la emoción del alumnado, porque dicha emoción determina su motivación y ésta, el futuro éxito de la actividad. En ese sentido, “Telegrama a un planeta” es una herramienta educativa con una componente de motivación tan potente como colorida. Apela directamente a la imaginación en sus formas más diversas. Después de todo, sus interlocutores son posibles extraterrestres y dado que, por el momento, aún no conocemos a ninguno, la fantasía queda automáticamente invitada a formar parte del juego. Es en este punto en el que “Telegrama a un planeta” aún podía prestar su servicio estrella a la comunidad educativa.

Como el terreno de lo fantástico es vasto, son muchas las fuentes de influencia que condicionan la percepción que tiene nuestro alumnado sobre la vida extraterrestre. Hablamos, naturalmente, del cine y la literatura pero también de los informativos (en los que ha resonado la expectación asociada a la desclasificación de expedientes de OVNI en EEUU); de las redes sociales y de los programas de televisión o canales de YouTube de índole sensacionalista.

En todas ellas, con relativa frecuencia, se aborda el tema desde una perspectiva más próxima a lo esotérico y paranormal que a lo científico. La difusión por parte de estos medios de testimonios e imágenes de presuntos avistamientos o abducciones imponen un relato que interfiere con el que procede de la investigación científica. Y esta interferencia es una barrera educativa que no podíamos ignorar. Es más, “Telegrama a un planeta” podía contribuir de una manera inigualable a su superación.

Poder hacer efectivo el envío de un mensaje confeccionado por estudiantes hacia un exoplaneta iba a suponer, en primer lugar, romper con muchos clichés y desbancar preconceptos, algo que en educación ponemos en práctica a diario: desaprender para luego aprender.

Y es que, en toda actividad educativa, primero hay que preparar el terreno antes de trabajarlo. Antes de ponerse a faenar, antes de plantearse el qué y el cómo hacer para conseguir unos pictogramas legibles a base de cuadritos blancos y negros, se hacía indispensable detenerse y reflexionar sobre si lo que se iba a hacer era sensato o no. Había que separar ciencia de ciencia-ficción; los hechos de las conjeturas; los hallazgos científicos de las fake news y la conspiranoia. Había que traer a las pizarras los proyectos SETI y METI, las Voyager y las Pioneer, el mensaje de Arecibo...

Sacar adelante “Telegrama a un planeta” ha implicado rescatar el tema de la vida extraterrestre y llevarlo a los pupitres en forma de saber curricular. Ha supuesto dignificarlo y revestirlo de la minuciosidad y del espíritu crítico propios del método científico, convirtiéndose así en una eficaz herramienta contra la desinformación.

RESULTADOS DEL CONCURSO

El concurso arrancó el pasado 11 de septiembre junto con el curso escolar y lo hizo con la publicación

de una [página web propia](#) en la que se especificaron dos plazos: 29 de septiembre para la inscripción de grupos y 31 de octubre para el envío de producciones.

En dicha página web, además de los aspectos puramente formales del concurso como plazos, formato del pictograma y memoria acompañante, procedimiento de envío y baremo para la valoración... publicamos una [guía didáctica](#) en la que se ofrecía al profesorado una serie de recursos con los que poder abordar en clase los temas citados anteriormente.

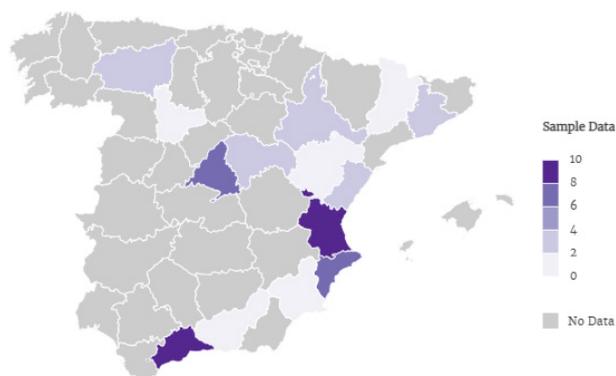
Ya sólo quedaba lanzar la llamada a los centros a través de los distintos canales de difusión y esperar que a éstos les resultara atractiva. Y qué mejor manera de atraer la atención que personificando (o tal vez deberíamos decir “alienificando”) el momento culminante objeto del concurso: una escena costumbrista de habitantes de Teegarden b que, de pronto, reciben un mensaje inusual a la hora del té. Una foto de familia extraterrestre que se ha convertido en el logo del concurso y que resultó de la unión de la IA con las charlas de café.



Científicos teegardianos sorprendidos por nuestro mensaje mientras toman el té en su jardín (Crédito: Beatriz Ramírez empleando la IA *NightCafe Creator*).

Recibimos inscripciones de muy distintos puntos de la geografía española, desde un total de ocho comunidades autónomas distintas (véase el mapa, también mostrado en la web con el [resultado del concurso](#)). En cuanto a las disciplinas de las inscripciones, creemos que es uno de los aspectos más interesantes de esta iniciativa. Esperábamos grupos de ciencias, claro, pero hemos contado también con la agradable sorpresa de grupos de filosofía, de valores éticos y de arte, lo que sin duda ha enriquecido enormemente el proyecto y ha potenciado el carácter transversal que buscábamos.

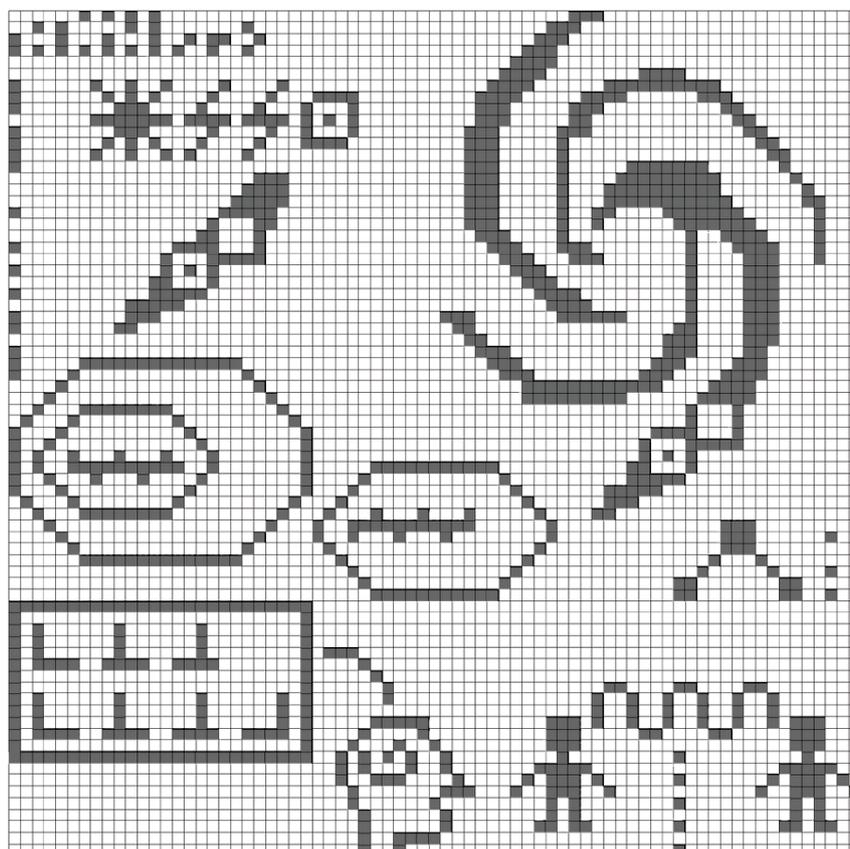
Para elegir el pictograma a enviar, de unos 100 centros inscritos, quedaron un total de 50 pictogramas válidos, que cumplían todos los requisitos de las bases. Después de separar datos de dibujos para hacerlos anónimos, un grupo de 7 personas pertenecientes a los centros organizadores (Juan Ángel Vaquerizo por CESAR, Fernando J. Ballesteros, José Carlos Guirado,

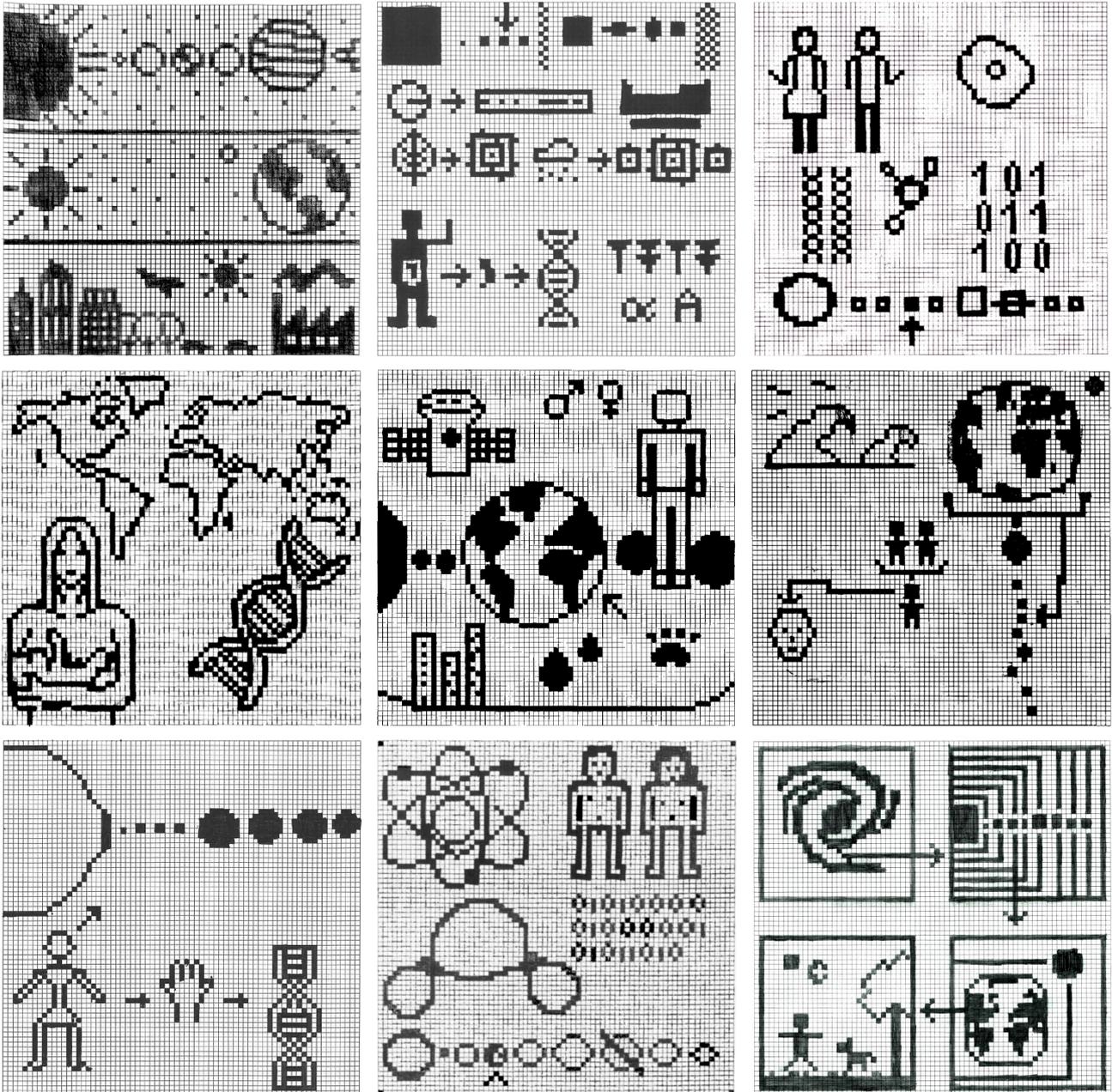


Distribución de centros concursantes.

Xusa Moya, Beatriz Ramírez y Amelia Ortiz por el OAUV, Alberto Fernández-Soto por el CSIC, y Pere Renom por TV3), siguiendo una rúbrica de parámetros a baremar previamente establecida y pública, evaluamos todos los trabajos y obtuvimos un ganador. El pictograma presentado por Carmen Ferrando Barberà, profesora de Biología de las alumnas de 1º de Bachillerato del IES Blasco Ibáñez de Cullera, Valencia, fue el elegido para lanzarlo al espacio.

Pictograma de las alumnas de 1º de Bachillerato del IES Blasco Ibáñez, ganador del concurso.





Pictogramas finalistas del concurso. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: 2º de Bachillerato del IES María Ibars (Dènia), 4º de ESO del Centro San Francisco de Asís (Yecla), 3ºA, 3ºB y 4ºA de ESO del Colegio Hermanos Amorós (Madrid), 4º de PDC del IES Benicalap (Valencia), 4º de ESO del IES Sierra Palomera (Cella), 1º de FPB del IES Miguel de Molinos (Zaragoza) y 4º de ESO del IES Pou Clar de Ontinyent.



Ordenador de control de las antenas (a través de la ventana se ve una de ellas) el día del primer envío con todo preparado y el pictograma ganador mostrándose en la pantalla de la derecha, listo para su envío (Foto: Oriol Bosch).

En este artículo hemos incluido una muestra de los diez pictogramas que obtuvieron mejor puntuación (incluyendo al ganador), pero la colección de todos ellos está disponible en la [videogalería](#) que hemos puesto en [la web](#) del concurso. Creemos que es un interesante ejercicio ver la colección entera en las aulas o fuera de ellas. Queremos destacar el alto nivel de las producciones, fruto de una obvia labor de investigación, reflexión, creatividad y coloquio en las aulas; no sólo de los pictogramas sino también de las memorias justificativas que los acompañan y de las preguntas que plantearía cada uno a la población de Teegarden b, preguntas como:

- ¿Tenéis sentimientos?
- ¿Os atreveríais a venir aquí para convivir y ayudarnos a mejorar la vida en la Tierra?
- ¿Qué significado le dais al tiempo, al progreso y a la vida?
- Nuestra clase quería preguntarles cómo son y que nos lo enseñaran. Y también nos gustaría comunicarles una advertencia: que el ser humano se está autodestruyendo y que si no se dan prisa, igual cuando vengan ya no existimos.

Y LLEGÓ EL DÍA DEL ENVÍO DEL MENSAJE

El pasado 8 de noviembre, las personas implicadas que pudimos ir nos desplazamos hasta Villanueva de la Cañada para compartir juntos la culminación del proyecto: el envío del pictograma ganador al exoplaneta Teegarden b, si bien la antena no apuntaba exactamente a la posición de Teegarden b, sino a la posición donde este exoplaneta estaría dentro de 12.5 años, cuando la señal emitida llegara finalmente allí. Fue un día muy emocionante y los nervios y la alegría estaban a flor de piel, como se puede ver en la [grabación](#) del streaming que realizamos para que la clase ganadora del concurso (que muy a su pesar no pudieron ir hasta ESAC) pudiera seguir desde Cullera el evento de la transmisión de su mensaje a otro mundo. Con todo preparado, esperamos con emoción el momento en el que la altura sobre el horizonte de la estrella Teegarden sobrepasaba la altura mínima de trabajo de la antena... y comenzó la emisión.

Dado que, como hemos dicho antes, la baja tasa de envío del mensaje implicaba un tiempo de envío del pictograma de más de hora y media, para agilizarlo al menos en este primer envío, al equipo a cargo

de las antenas se le ocurrió una ingeniosa alternativa, basada en el nombre del concurso. Dado que se llamaba Telegrama a un planeta, se consideró la opción de hacer la transmisión del mensaje de una manera "manual". El equipo técnico del INTA configuró el sistema de modo que la transmisión de los píxeles se pudiera hacer manualmente y de manera sucesiva. Se podría ir enviando el pictograma píxel a píxel, sin más que ir pulsando sucesivamente "intro" a través de un teclado conectado al sistema de control. Así, se decidió que el "envío del telegrama" se haría manualmente por todos los miembros de equipo reunidos el día de la transmisión.

Como resultado de este método, el tiempo del envío se redujo significativamente, pues cada miembro del equipo fue capaz de enviar su parte del pictograma a un bit rate variable de 8-10 bit/seg (dependiendo de la velocidad de pulsación de cada uno), resultando en un tiempo de envío inferior a los 10 minutos. La versión reducida del Cosmic Call que Yvan Dutil preparó como añadido al pictograma de la clase ganadora se envió a continuación y con el mismo procedimiento manual. Al tratarse de un pictograma de mayor tamaño que el de la clase (73x365 píxeles), el tiempo de envío fue mayor, pero no llegó a los 25 minutos.

En total, la primera transmisión del mensaje a Teegarden b realizada la tarde del día 8 de noviembre consistió en el envío en tándem del pictograma ganador y del Cosmic Call mini. La transmisión comenzó a las 19:20h (18:20h UTC) y terminó sobre las 20:30h (19:30h UTC).

CONTINUARÁ

A lo largo del proceso de recepción de trabajos así como de consultas y resolución de dudas hacia el profesorado participante, hemos recibido numerosas comunicaciones en las que no sólo se agradecía la iniciativa sino que también se compartía la satisfacción y el éxito con los que se había llevado a cabo la propuesta en las aulas. Este éxito nos ha llevado a todos los participantes en esta "prueba piloto" a decidir que el proyecto no se quede aquí, sino que se consolide como un proyecto anual y que ésta haya sido solamente la primera edición de "Telegrama a un planeta".

Ha sido muy emocionante dar testimonio de cómo un mensaje destinado a una hipotética civilización se ha convertido al mismo tiempo en un mensaje a las aulas. En una llamada a ensanchar horizontes y a ampliar alcances. En una llamada a nuestra propia civilización, que volveremos a efectuar al inicio de cada curso.

Foto de grupo el día del envío. De pie, fondo: Benjamin Montesinos (presidente de la SEA), José Antonio Caballero (CAB -codescubridor de Teegarden b), Juan Ángel Vaquerizo (CESAR), Fernando J. Ballesteros (OAUV -*photoshopped in absentia*), José Carlos Guirado (OAUV) e Ignasi Ribas (IEEC -codescubridor de Teegarden b). De pie, frente: Isabel Alonso (INTA), Beatriz Ramírez (Aula del Cel/OAUV), Sandra Benítez (CESAR), Noelia Jiménez (INTA) e Ivan Lora (INTA). En cuclillas: Pere Renom (TV3 -el culpable de todo) y Xusa Moya (Aula del Cel/OAUV) (Foto: Oriol Bosch).



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.

JOHN BECKMAN CELEBRA SU 60º ANIVERSARIO PROFESIONAL POR TODO LO ALTO

Con motivo de los 60 años de carrera profesional de nuestro compañero y primer tesorero de la SEA, John Beckman (IAC), se celebró una reunión de dos días en el Museo del Cosmos de la Laguna al que asistieron el personal investigador que ha colaborado con John y algunos de sus estudiantes de tesis doctoral. ¡Enhorabuena John y que cumplas muchos más!

PEPA MASEGOSA, PREMIO AL ESPÍRITU UNIVERSITARIO Y VALORES HUMANOS

Nuestra incansable compañera Josefa (Pepa) Masegosa (IAA-CSIC) ha sido galardonada con el Premio al Espíritu Universitario y Valores Humanos por el Consejo Social de la Universidad de Almería. El premio se ha concedido como reconocimiento a su trabajo de cara a la igualdad de la mujer en la ciencia, y en particular en la astronomía. ¡Enhorabuena, Pepa, y sigue luchando por la igualdad que aún nos falta mucho!

ADRIANA DE LORENZO-CÁCERES, HIJA PREDILECTA DE TENERIFE

Adriana de Lorenzo-Cáceres (IAC) ha sido nombrada hija predilecta de Tenerife, por su papel en el ámbito de la sociedad, la cultura y la investigación en la isla. Adriana, además de ser una activa investigadora en el campo de la astrofísica extragaláctica, ha realizado una importante labor dentro de la Comisión Mujer y Astronomía de la SEA. ¡Muchas felicidades, Adriana!

EVA VILLAVER, NUEVA DIRECTORA DE LA OFICINA DE ESPACIO Y SOCIEDAD

El pasado 21 de junio, el Consejo Rector de la Agencia Espacial Española, aprobó el nombramiento de Eva Villaver (IAC), como directora de la Oficina de Espacio y Sociedad. ¡Enhorabuena y mucho éxito en esta tarea!

VICENT MARTÍNEZ, PREMIO CIUTAT DE BENICARLÓ

Vicent Martínez (UV) ha sido galardonado con el Premio Ciutat de Benicarló en la sección de divulgación científica por su obra "Abriendo las puertas del cielo". En el libro reúne varios de los artículos que ha ido publicando en la revista de divulgación científica *Mètode* a lo largo de más de diez años, tocando temas muy variados dentro del campo de la astronomía. ¡Muchas felicidades, Vicent!

ALEJANDRO MUS, PREMIO EARLY CAREER DE LA COLABORACIÓN EHT

La tesis doctoral titulada "Deconvolution techniques for dynamical interferometric observations" defendida por Alejandro Mus y dirigida por Iván Martí (ambos de la UV) ha sido galardonada con el premio "Early Career" de la colaboración Event Horizon Telescope a la mejor tesis doctoral de 2023. ¡Enhorabuena a los dos!

OBITUARIO

Con mucha tristeza, hemos despedido recientemente a Carlos Rodrigo Blanco, miembro de la SEA, y miembro del equipo del Observatorio Virtual Español en el Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA). Descanse en paz.

LA VIDA Y SU BÚSQUEDA MÁS ALLÁ DE LA TIERRA

Ester Lázaro Lázaro

ISBN: 978-84-1352-682-9

Editorial: Los Libros de la Catarata

Todos conocemos a grandes rasgos la evolución de la autopercepción del ser humano y su lugar en el cosmos, la historia geológica de la Tierra, las características de los planetas y lunas del Sistema Solar, los elementos que constituyen las células y los que caracterizan a los seres complejos, y las estadísticas de la posibilidad de vida en el Universo. No había caído en la cuenta de que existe una ciencia que las aúna a todas a ellas. Recientemente RTVE emitió el documental "Astrobiología, la Super-ciencia" y, tras leer este libro, no podría estar más de acuerdo con ese título.

En "La Vida y su Búsqueda Más Allá de la Tierra", Ester Lázaro revisita todos estos temas y les proporciona el novedoso (al menos para mí) enfoque de la Astrobiología. Por ejemplo, sabemos del profundo choque con la Iglesia que supusieron las ideas de Copérnico, Giordano Bruno y Galileo, pero nunca había pensado en las implicaciones que tuvieron para el pensamiento de la sociedad coetánea relativo a la pluralidad de mundos y a la posibilidad de vida fuera de la Tierra. La autora nos acompaña en esta reflexión, y también en la revolución análoga estimulada en Biología por la discusión sobre qué diferencia la materia viva y la inerte.

A continuación, el libro recorre diferentes retos que se corresponden con directrices básicas de la Astrobiología. El primero de ellos es entender cómo surge la vida en la Tierra, y qué necesita, como paso previo a buscar vida en el Universo. He de decir que disfruté enormemente de este repaso con prisma astrobiológico de la Biología que aprendí en el instituto (junto con otros conceptos que se introducen de manera asequible para los no expertos), y de cómo la autora lo entrelaza con la teoría de la Evolución y la Tectónica de placas.

El siguiente reto parte de comprender que las similitudes moleculares de la biota terrestre implican un origen único de la vida actual en la Tierra, un ancestro común (LUCA). Contando sólo con este ejemplo de vida, no podemos dilucidar si toda la vida en el Universo debe ser similar o simplemente éste es el que mejor se ha ido adaptando a las cambiantes condiciones de la Tierra. La autora presenta así dos pilares adicionales de la Astrobiología: la búsqueda de una definición universal de "¿Qué es la vida?", y el ejercicio de imaginar qué otros ambientes y qué otras fuentes de energía podrían propiciarla. Nos introducimos en el campo de la Extremofilia

¿QUÉ SABEMOS DE?

La vida y su búsqueda más allá de la Tierra

Ester Lázaro Lázaro



como observación de soluciones adaptativas a condiciones extremas para ampliar nuestras miras.

Un último pilar de la Astrobiología consistiría en la identificación de observables que señalicen la vida. El libro nos adentra en una búsqueda ingeniosa de biomarcadores con origen abiótico poco probable, abarcando desde el nivel celular hasta los gases de una atmósfera planetaria. Además, nos presenta los métodos de detección y los experimentos dedicados en el pasado (las famosas Viking) y futuro. Las últimas secciones recorren los planetas y lunas del Sistema Solar que podrían albergar vida, deteniéndose en Marte, y describen las investigaciones que se están realizando en análogos terrestres de estos entornos.

Al finalizar el libro tres grandes sensaciones perduran. La primera es una nueva apreciación de la Astrobiología como ciencia que, además de buscar vida fuera de la Tierra, puede ayudarnos a comprender el origen del ser humano conjuntamente con la evolución de nuestro planeta. La segunda, es una gran lección de humildad más allá de que la Tierra sea otro planeta más y que la Humanidad sea el producto de la evolución tras LUCA: la biosfera terrestre está dominada por organismos unicelulares que no necesitan de los seres complejos y que, al contrario que éstos, han logrado sobrevivir a los grandes cambios que ha experimentado la Tierra. La última es el refuerzo en la convicción de que hay muchos argumentos a favor de la existencia de vida extraterrestre, de la mano de la desilusión (o quizá la tranquilidad) de que en su mayoría será microscópica y no inteligente.

Miriam García García
Centro de Astrobiología (CAB)

Vientos en núcleos activos de galaxias de baja luminosidad

Autora: Laura Hermosa Muñoz

Tesis doctoral dirigida por: Isabel Márquez y Sara Cazzoli

Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía-CSIC

Fecha de lectura: 30 de noviembre de 2022

La tesis se centra en el estudio de los procesos de retroalimentación en galaxias que albergan un Núcleo Galáctico Activo (AGN) de baja potencia. En el extremo de baja luminosidad de la familia de AGNs, encontramos las llamadas regiones nucleares de líneas de emisión de baja ionización (LINERs). Son los AGNs más numerosos del Universo local (>60%) lo que les da la ventaja de poder hacer estudios espacialmente resueltos sobre sus propiedades físicas. Además, se cree que son el eslabón intermedio entre las galaxias activas y las inactivas.

Durante los últimos 20 años, los trabajos sobre galaxias activas y no activas se han centrado en el análisis de los procesos de retroalimentación, en particular los impulsados por los *outflows*. Se cree que estos procesos tienen un papel crucial en la evolución de las galaxias, al regular la formación estelar y la actividad nuclear. Se cree que los *outflows* aparecen en todos los AGNs en algún momento de su evolución, aunque hasta ahora su presencia se había estudiado fundamentalmente en los más luminosos, ya que son más fáciles de detectar y caracterizar. Por el contrario, su presencia en LINERs no se había estudiado de forma sistemática hasta este trabajo.

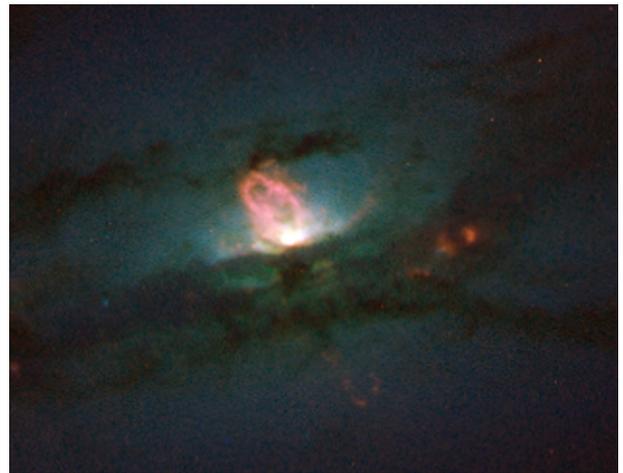
En esta tesis exploramos la presencia de *outflows* en LINERs usando tres aproximaciones complementarias basadas en datos obtenidos con tres técnicas: imágenes de banda estrecha y espectroscopía de rendija larga y de campo integral (IFS).

En la primera parte, usamos espectros ópticos de rendija larga de la parte nuclear de una muestra de LINERs de tipo 2 con datos del HST. Caracterizamos las líneas de emisión haciendo un ajuste gaussiano, que mostró la existencia de perfiles complejos en algunos objetos. Identificamos los *outflows* como componentes principalmente desplazadas hacia el azul y muy anchas, que solo pueden ser explicados como movimientos no rotacionales del gas. Encontramos en la muestra que un 22% de los LINERs son candidatos a tener *outflows* (Hermosa Muñoz et al. 2020).

En la segunda parte, compilamos con datos propios (ALFOSC/NOT) y de archivo (HST) el mayor atlas de imágenes de H α (gas ionizado) en LINERs hasta la fecha para estudiar sistemáticamente la presencia de *outflows*. Analizamos la morfología del gas ionizado, identificando *outflows* como gas extendido en forma de filamentos, burbujas o conos, identificados para un 32% de la muestra. Sin embargo, la morfología por sí sola no es suficiente como para confirmar la existencia de un *outflow*. Por ello combinamos nuestros datos de imagen con información espectroscópica de la literatura de las galaxias que reportara la detección de *outflows* o movimientos no rotacionales. Usando ambas, encontramos que en el Universo Local aproximadamente el 50% de los LINERs son candidatos a albergar un *outflow* (Hermosa Muñoz et al. 2022).

Finalmente, hicimos un seguimiento de los mejores candidatos con datos de espectroscopía de campo integral, que nos

Imagen del *outflow* en gas ionizado de la galaxia NGC4438, observada con HST. Crédito: NASA/ESA, Jeffrey Kenney (Yale University), Elizabeth Yale (Yale University).



permite no solo confirmar la existencia de estos *outflows*, sino obtener sus principales características (masa, energía, tamaño, etc) de una forma espacialmente resuelta. El primer análisis fue de la galaxia NGC1052, conocida por ser un ejemplo prototípico de LINER. Con datos combinados de alta resolución espacial (MUSE/VLT) y de alta resolución espectral (MEGARA/GTC), pudimos identificar y caracterizar la existencia de un *outflow* de gas ionizado. Nuestros resultados son consistentes con que el jet de esta galaxia sea el conductor principal del gas hacia afuera de la galaxia (Cazzoli, Hermosa Muñoz et al. 2022). Esto es consistente con la idea reportada en trabajos anteriores de la literatura sobre los jets teniendo un impacto importante en la producción de los *outflows*, sobre todo en el caso de AGNs de baja luminosidad.

Tras el caso particular de NGC1052, continuamos el trabajo con la muestra principal de galaxias con datos de MEGARA/GTC. Encontramos confirmación cinemática de *outflows* para un 75% de la muestra, en algunos casos extendidos y similares al caso de NGC1052 (Hermosa Muñoz et al. in prep.).

Por tanto, de manera general, nuestro trabajo indica por primera vez que los *outflows* son comunes en LINERs. Además, abre una nueva vía de exploración sobre cómo se producen los *outflows* en LINERs y cuál es la contribución que tienen los jets, ya que hemos encontrado relación entre ambos sucesos. Esa línea abierta sobre la relación de los *outflows* en el óptico con el radio se va a continuar con otra tesis doctoral en el IAA (iniciada en octubre de 2022).

Tesis disponible en: <https://digibug.ugr.es/handle/10481/79133>

Discos Keplerianos y flujos en estrellas binarias post-AGB

Autor: Iván Gallardo Cava

(i.gallardocava@oan.es)

Tesis doctoral dirigida por: Valentín Bujarrabal Fernández y Javier Alcolea Jiménez

Centro: Observatorio Astronómico Nacional (OAN-IGN) – Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 17 de febrero de 2023

Los objetos de esta tesis pertenecen a una clase específica de estrellas post-AGB: forman parte de un sistema binario con periodos orbitales entre 100 y 3000 días; la separación del sistema es inferior a 5 AU; tienen un exceso en el infrarrojo cercano (NIR) en su distribución espectral de energía (SED) que indica la presencia de polvo caliente; muestran indicios de discos rotantes estables alrededor del sistema estelar. La nebulosa que hay alrededor de una estrella post-AGB es conocida como nebulosa pre-Planetaria (pPNe) y la mayoría de ellas muestra usualmente flujos bipolares. Esta tesis doctoral se ha centrado en el estudio de las nebulosas alrededor de estas estrellas binarias post-AGB. Estas nebulosas están formadas por un disco kepleriano y unos flujos bipolares de velocidad lenta conocidos como vientos de disco. La observación de estas fuentes se ha realizado en frecuencias radio, concretamente en ondas milimétricas.

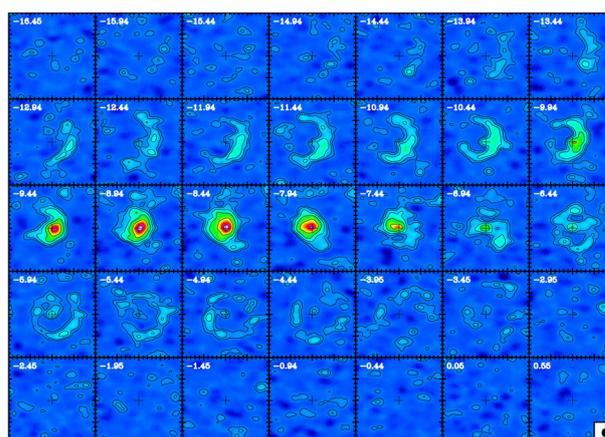
Uno de los pilares de esta tesis es el estudio cinemático de cuatro de estos objetos a partir de mapas interferométricos obtenidos con NOEMA de las líneas ^{12}CO y ^{13}CO $J = 2 - 1$, así como de su posterior modelado para poder extraer información cuantitativa. Estos mapas revelan la presencia de un disco rotante en el interior de la nebulosa y de una componente en expansión de baja velocidad que parece emanar del disco. Ahora sabemos de manera certera que algunos de estos objetos están dominados por el disco, mientras que en otros es la componente de baja velocidad en expansión la que predomina sobre la estructura rotante. Así, podemos clasificar ACHerculis como *disk-dominated* (junto con los objetos previamente estudiados: RectánguloRojo, IWCarinae e IRAS08544–4431), ya que el $\sim 90\%$ de la masa nebulosa total estaría localizada en el disco rotante. Sin embargo, IRAS 19125+0343 y R Scuti son *outflow-dominated*, ya que sus flujos bipolares representan el $\sim 75\%$ de la masa nebulosa. El caso de 89Herculis es peculiar: sus mapas interferométricos sufren pérdida de flujo y muestran un aparente reparto equitativo entre el disco y los flujos bipolares. Gracias a la observación *on-the-fly* con el telescopio de 30 m de IRAM, pudimos obtener mapas de potencia total que podían ser mezclados con los mapas interferométricos, obteniendo así mapas combinados de alta resolución que contenían ya todo el flujo de la fuente. Estos mapas mezclados y su posterior modelado revelan que 89Herculis presenta un disco rotante en el interior de la nebulosa y unos flujos bipolares con forma de reloj de arena mucho más extensos y masivos de lo que pensábamos. De esta manera, esta fuente cuyos flujos bipolares constituyen el 65% de la masa nebulosa total, se une a los objetos *outflow-dominated*. Ver Gallardo Cava et al. (2021, A&A, 648, A93) y Gallardo Cava et al. (2023, A&A, 671, A80; ver también Gallardo Cava et al. 2022, Astronomy, 1(2), 84).

El otro pilar de esta tesis es el análisis químico de diez de estos objetos, cuya composición química era prácticamente desco-

nocida hasta este trabajo, por lo que este estudio supuso el primer mapeado observacional químico de estos objetos llevado a cabo en ondas milimétricas en este tipo de estrellas post-AGB binarias. Las observaciones de antena única se realizaron con los radiotelescopios de 30m del IRAM y 40m del IGN en las longitudes de onda de 1.3, 2, 3, 7 y 13 mm. Aquellas fuentes que presentan flujos masivos de gran tamaño tienden a presentar en general un contenido molecular mayor. Este es el caso de RScuti y Al Canis Minoris, donde hemos detectado SiO (térmico y máser), SO, SO₂, HCO+ y emisión máser de H₂O a 22 GHz (y la detección previa de máser de OH a 1.6 GHz). En IRAS 20056+1834, otra fuente dominada por los flujos bipolares, también hemos detectado emisión máser de SiO. 89Herculis, otra fuente *outflow-dominated*, presenta emisión de HCN, SiS, CS, C¹⁷O, y C¹⁸O. Por otra parte, encontramos poco contenido molecular en las fuentes dominadas por los discos. Este es el caso del RectánguloRojo, donde hemos detectado SO, H₂O, C¹⁷O, y C¹⁸O (y H¹³CN de observaciones previas), mientras que ACHerculis presenta una detección tentativa del máser de SiO. Este es el inventario total de moléculas detectadas hasta la fecha en nebulosas alrededor de estrellas binarias post-AGB. Adicionalmente, podemos clasificar la química de nuestros objetos como oxigenada ($\text{C/O} < 1$) o carbonada ($\text{C/O} > 1$): las nebulosas alrededor de ACHerculis, el RectánguloRojo, Al Canis Minoris, IRAS20056+1834, HD52961 y RScuti son medios oxigenados, mientras que la de 89Herculis es carbonada. Ver Gallardo Cava et al. (2022, A&A, 659, A134). Esta tesis presenta un estudio muy completo de este tipo de objetos en ondas milimétricas, cuyos resultados han sido obtenidos a través de distintos métodos de observación: por una parte, hacemos un estudio muy detallado de la cinemática de estos objetos a través de observaciones interferométricas de NOEMA y complejos modelos. Por otra parte, estudiamos la química de estas fuentes gracias a observaciones de antena única. La combinación de estos métodos de observación y análisis proporciona un estudio completo del gas molecular presente en estas fuentes. Por ello, esta tesis doctoral servirá como referencia para futuros estudios del gas molecular en nebulosas alrededor de estrellas binarias post-AGB.

Tesis doctoral disponible en: <https://docta.ucm.es/entities/publication/d95b1a2b-6404-480d-ae7c-38645d5cce5e>

Emisión de ^{12}CO $J = 2 - 1$ de la nebulosa alrededor de la estrella binaria post-AGB 89Herculis.



Formación estelar en cúmulos de alta y baja masa: explorando las condiciones iniciales y el *feedback* en protoestrellas y sus discos

Autora: Mara Elizabeth Pelayo Baldárrago

Tesis doctoral dirigida por:

Aurora Sicilia Aguilar

Centro: Universidad Autónoma de Madrid

Fecha de lectura: 30 de marzo de 2023

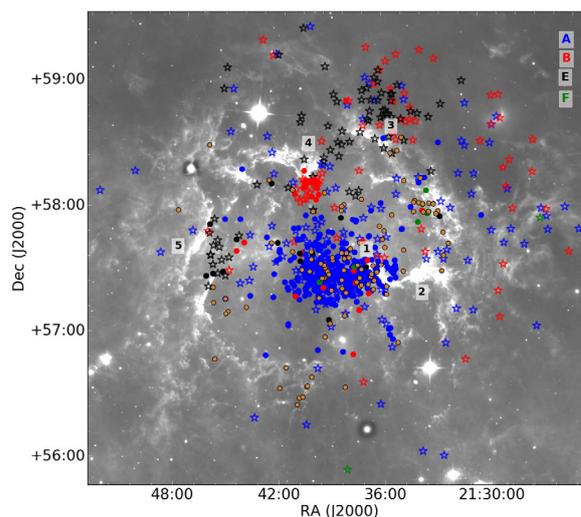
Dentro de los estudios de formación estelar en cúmulos de alta y baja masa, se cree que la huella de las condiciones iniciales tiene un efecto directo en la eficiencia de formación estelar (SFE, p. ej., Rohde et al., 2021), en la función inicial de masa (IMF, Hsu et al., 2013) y en las propiedades de los discos protoplanetarios y su posterior evolución (e.g., Fang et al., 2009).

En mi trabajo de tesis, estudié el impacto de las condiciones iniciales en los procesos de formación de las estrellas y sus discos en diferentes entornos, utilizando dos jóvenes regiones de formación estelar como regiones referentes: una región HII con formación estelar de alta masa, IC1396, y el cúmulo del Coronet, el cual es una región de formación estelar sin estrellas masivas pero con una alta densidad estelar. Esta tesis presenta un estudio global y sistemático de ambas regiones en relación con los procesos de formación estrella-disco. Realicé la caracterización observacional de las interacciones entre las estrellas y el entorno del cúmulo, la distribución espacial, la edad y masa de los miembros, la fracción de discos, la estructura de velocidad, y exploré los efectos del *feedback* y la densidad estelar para obtener un panorama general de la historia de formación de ambas regiones. Combiné varias técnicas y observaciones multilongitud de onda y multitrizadores, incluyendo imágenes en el óptico y el infrarrojo cercano junto con mapas de *Herschel* y *Spitzer*, espectros ópticos, datos milimétricos en el continuo y líneas moleculares y datos de *Gaia*. Esto me permitió estudiar las dos regiones a diferentes profundidades y escalas.

Los resultados obtenidos permitieron caracterizar la estructura y propiedades de ambas regiones y sus miembros, así como las condiciones iniciales que afectan el proceso de formación estrella-disco. La historia de formación de la región IC1396 es compleja. Los datos de *Gaia* EDR3 confirman una distancia de 925 pc. IC1396 está compuesta de cuatro subcúmulos y una población extendida. Los cuatro subcúmulos son significativamente diferentes en movimiento propio, pero no en paralaje. También encontré diferencias entre las edades de los subcúmulos y los miembros de estos no están distribuidos espacialmente de manera uniforme por la región. Los miembros del subcúmulo A están concentrados en el centro de la región y los miembros de los subcúmulos B y E distribuidos por el borde de la región, cerca de las principales nubes de borde brillante (ver figura). Asimismo, encontré que la región se está expandiendo de forma global, señal de que no está gravitacionalmente ligada. La combinación de la cinemática, la edad y las diferencias de estado evolutivo en los grupos de fuentes dentro de la misma nube indica que la región ha sufrido múltiples episodios de formación estelar a través del tiempo,

probablemente desencadenada por diferentes mecanismos. Esta tesis también demostró la importancia de los datos de *Gaia* al completar los cartografiados de cúmulos, incluyendo estrellas de masa intermedia.

La historia de formación del cúmulo del Coronet no es tan dramática. Los datos de *Gaia* DR3 confirman una distancia de 154 pc. Aunque nuestro estudio se restringe al pequeño cúmulo en la región R CrA, encontramos que el *feedback* de las estrellas de baja masa e intermedia está afectando a la nube y a las condiciones iniciales de la formación estelar posterior debido a su alta densidad estelar. Encontramos que el *feedback* estelar por estrellas de masa baja e intermedia ($2-3 M_{\odot}$) tiene efectos disruptivos en escalas de unos pocos miles de unidades astronómicas. Los mapas de temperatura y densidad indican que estos efectos son suficientes como para evitar la formación estelar en regiones de alta densidad cercanas a las estrellas de masa intermedia. Por el contrario, regiones de alta densidad alejadas de estrellas de masa intermedia muestran señales de colapso, con la consecuente formación estelar. La cinemática de los miembros revela que no hay diferencias significativas entre los distintos miembros del cúmulo, lo cual indica que todo es parte del mismo grupo o filamento. La dispersión en las velocidades en el plano del cielo (movimientos propios) y velocidades radiales es también consistente. Finalmente, la cinemática del gas indica que este no está gravitacionalmente ligado en la parte central del cúmulo. Estos resultados, junto con nuestras observaciones del *feedback* estelar, sugieren que las estrellas de masa intermedia podrían estar dispersando la nube y deteniendo la formación estelar, y también podrían explicar la baja masa y el estadio evolutivo de los discos protoplanetarios observados en este cúmulo.



Distribución espacial de los miembros conocidos (círculos) y nuevos (pentágonos) de la región IC1396. La imagen del fondo es un mosaico de $\sim 4^{\circ} \times \sim 4^{\circ}$ de la región de IC1396, a partir de imágenes de WISE ($22.2 \mu\text{m}$). Los colores representan los cuatro subcúmulos (A, B, E, F) como indica la leyenda. Los círculos naranjas señalan los miembros conocidos que no pertenecen a ningún subcúmulo. El tamaño de los símbolos representa la edad, considerando un rango entre 0,1 a 20 Myr, y siendo los más jóvenes los símbolos más grandes. Los números en negro indican las principales nubes de borde brillante (BRCs), 1=IC1396 A, 2=IC1396 B, 3=IC1396 D, 4=IC1396 N, 5=IC1396 G (Pelayo-Baldárrago et al. 2023).

Técnicas experimentales para el estudio de galaxias distantes con instrumentación puntera de GTC

Autora: Cristina Cabello González
(criscabe@ucm.es)

Tesis doctoral dirigida por: Jesús Gallego
Maestro y Nicolás Cardiel López

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 25 de mayo de 2023

Durante las últimas décadas, la astronomía observacional ha experimentado una revolución debido tanto a la construcción de telescopios cada vez más grandes que nos permiten observar objetos más lejanos y débiles, como a los avances tecnológicos que han permitido diseñar instrumentos muy precisos y potentes. El Gran Telescopio Canarias (GTC) es actualmente el mayor telescopio óptico-infrarrojo del mundo y está equipado con instrumentos científicos de última generación que, en conjunto, ofrecen una amplia variedad de modos de observación. Esta combinación de gran área colectora e instrumentación avanzada es clave para abordar los retos astronómicos actuales.

En esta tesis exploramos las capacidades y prestaciones de los principales instrumentos de GTC empleando diferentes modos de observación (fotometría de banda estrecha en el infrarrojo cercano, espectroscopía de rendija larga en el infrarrojo cercano y en el óptico, espectroscopía multiobjeto en el infrarrojo cercano y espectroscopía de campo integral en el óptico) para proporcionar información sobre la población de galaxias a alto desplazamiento al rojo (z).

Es importante destacar que los instrumentos modernos generan una enorme cantidad de datos que los astrónomos tienen que procesar antes del análisis científico. Además, debido a la complejidad de los nuevos modos de observación, el proceso

de reducción no es trivial y se requiere un gran esfuerzo para calibrar los datos con precisión, lo que suele aumentar el tiempo transcurrido entre las observaciones y la publicación científica de los resultados. Conscientes de este importante hecho, desarrollamos, y posteriormente pusimos a disposición de la comunidad astronómica en GitHub, los códigos de *Python* y los cuadernos de *Jupyter* empleados para la calibración precisa de diferentes conjuntos de datos de los instrumentos CIRCE, EMIR, OSIRIS y MEGARA del GTC.

Los principales objetivos de esta tesis son: (1) la identificación de varios casos científicos relacionados con fuentes lejanas para explorar tanto el potencial como las posibles limitaciones de los diferentes modos de observación de cada instrumento del GTC, (2) el desarrollo de técnicas y métodos experimentales para el tratamiento de cada conjunto de datos específico, y (3) la implementación de la política de ciencia abierta, proporcionando no solo la metodología sino también los códigos necesarios para que nuestro trabajo sea accesible y fácilmente reproducible.

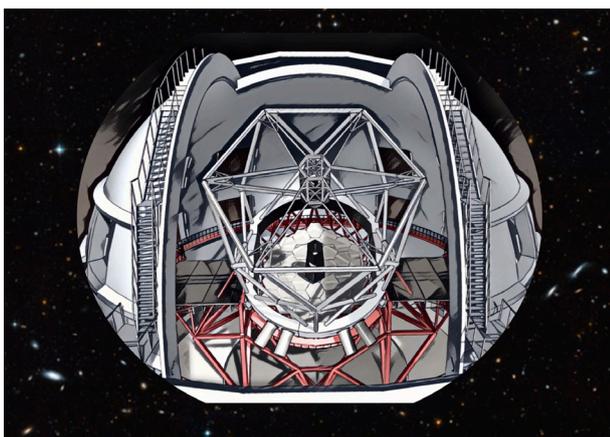
En particular, los casos científicos presentados en esta tesis abordan proyectos desafiantes que van desde la búsqueda de emisores Lyman- α (LAEs, de sus siglas en inglés) a $z = 9,3$, al estudio de grandes muestras de galaxias de baja masa con formación estelar en torno a $z \sim 1$, la caracterización de un particular blazar a $z \sim 3,6$, y finalmente el estudio espacialmente resuelto de una galaxia local clasificada como potencial emisora de fotones del continuo de Lyman (LyC, de sus siglas en inglés) y análoga a las galaxias de la época de la reionización.

Estos proyectos condujeron a (1) la derivación de restricciones observacionales en la función de luminosidad Ly α a $z \sim 9$ utilizando la técnica de filtro estrecho y la cámara infrarroja CIRCE; (2) la caracterización del modo multiobjeto del espectrógrafo infrarrojo EMIR y la identificación de los graves problemas de sensibilidad del detector actual; (3) el descubrimiento del primer emisor en rayos gamma de tipo BL Lacertae a $z > 3$ utilizando la combinación de los modos de rendija larga de EMIR (en el infrarrojo cercano) y OSIRIS (en el óptico); (4) la identificación de variaciones espaciales en las propiedades físicas y la estructura ionizante de una galaxia análoga a las primeras galaxias utilizando datos ópticos de la unidad de campo integral de MEGARA. Además, también desarrollamos un script en Python para complementar la pipeline de reducción de datos de MEGARA y proporcionar, por primera vez, una estimación de las incertidumbres aleatorias de cualquier parámetro que pueda derivarse utilizando datos de MEGARA.

Los principales resultados de estos proyectos pueden encontrarse en Cabello et al. (2022), Paliya, Domínguez, Cabello et al. (2020), y Cabello et al. 2023 *en preparación*. Además, los hallazgos de esta tesis refuerzan el caso técnico y científico presentado en Salvador-Solé et al. (2022) y Garzón et al. (2022).

En conclusión, esta tesis explora y proporciona los métodos y técnicas para realizar un cuidadoso procesado y análisis de los datos tomados con diferentes instrumentos del GTC en sus múltiples modos de observación. Siguiendo la política de acceso abierto, las rutinas y los códigos *Python* desarrollados en este trabajo se han puesto a disposición pública para el uso de la comunidad astronómica. Esto asegura una reproducibilidad justa de los resultados de la investigación y promueve una ciencia más eficiente. Además, la metodología puede transferirse fácilmente a cualquier instalación en el infrarrojo cercano y óptica, lo que convierte a este documento en un marco de referencia para los futuros instrumentos que se montarán en los telescopios de próxima generación, los telescopios gigantes.

Representación artística de la cúpula e interior del Gran Telescopio Canarias (GTC).



Cosmología con la medida de la escala de las oscilaciones acústicas de bariones en grandes cartografiados de galaxias

Autor: Juan Mena Fernández
(juanmena95@hotmail.es)

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

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

Fecha de lectura: 19 de octubre de 2023

La cosmología ha experimentado una revolución en las últimas décadas, impulsada por los avances en técnicas de observación, modelos teóricos y capacidades computacionales. Entre sus logros más significativos está el establecimiento de Λ CDM como el modelo cosmológico estándar, el cual ha transformado nuestra comprensión de la composición y evolución del Universo. Λ CDM describe el Universo como compuesto principalmente de energía oscura en forma de una constante cosmológica, Λ ; materia oscura fría (CDM); y materia bariónica ordinaria. Dicho modelo explica con éxito una amplia gama de observaciones cosmológicas, incluida la expansión acelerada del Universo, la radiación del fondo cósmico de microondas, la abundancia de elementos ligeros y la distribución de galaxias a gran escala.

Esta tesis ha sido desarrollada dentro de las colaboraciones *Dark Energy Survey* (DES) y *Dark Energy Spectroscopic Instrument* (DESI). Estos proyectos tienen como objetivo establecer medidas precisas sobre la naturaleza de la energía oscura y, también, estudiar la estructura a gran escala del Universo. Grandes cartografiados de galaxias como DES y DESI representan un papel fundamental en el aumento de nuestra comprensión de la cosmología dentro del marco del modelo Λ CDM. Una de las sondas cosmológicas clave utilizada en sus estudios es la medida de la escala de las oscilaciones acústicas de bariones (BAO), que son las huellas de las ondas de sonido primordiales del Universo primitivo que dejaron rasgos característicos en la distribución a gran escala de la materia. La

escala de las BAO sirve como una “regla estándar” en cosmología, proporcionando medidas precisas de distancias cósmicas que pueden usarse para constreñir parámetros cosmológicos, como la densidad de la materia, la constante de Hubble y la ecuación de estado de la oscura.

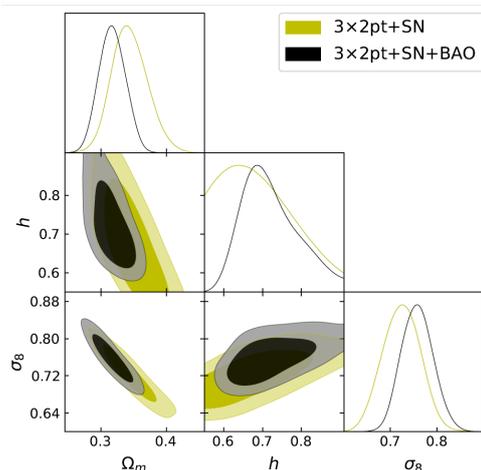
En esta tesis desarrollamos un método de ajuste de la escala BAO basado en plantillas para extraer la información sobre dicha escala de la función de correlación angular. Estudiamos la aplicabilidad y validez de dicho método, y mostramos que sus resultados son robustos frente a variaciones en la cosmología de la plantilla y, también, frente a variaciones en la configuración predeterminada para los ajustes. Una vez validado, el método se aplica los datos del año 3 de DES, donde obtenemos una medida de la distancia de $d_M(0.835)/r_d = 18,94 \pm 0,48$, que es consistente con Planck a $2,5\sigma$. Esto representa la medida de la escala BAO más precisa de un cartografiado de galaxias fotométrico hasta la fecha, con un error relativo del 2,6%. Combinando nuestra función de verosimilitud de BAO con las otras principales del año 3 de DES, a saber, $3\times 2pt$ (combinación de *galaxy clustering* y *weak lensing*) y supernovas, encontramos medidas más precisas de h , Ω_m y σ_8 . Después de la combinación, la distribución de probabilidad de h es más simétrica, con una ganancia en el poder de restricción de 20%; el error en Ω_m se reduce en 25%; y la determinación de σ_8 mejora un 16% (ver figura).

Por otro lado, en esta tesis también describimos el análisis BAO del año 6 de DES. Primero, realizamos una optimización de la muestra del año 6, y prevemos un aumento de precisión de un 25% en la medida de la escala BAO con respecto al análisis del año 3. Luego, utilizamos nuestro método de medida de la escala BAO en las simulaciones del año 6, donde encontramos que el aumento en la precisión con respecto al año 3 es consistente con lo que esperamos de las previsiones.

Finalmente, estudiamos el impacto de las incertidumbres sistemáticas relacionadas con la distribución de ocupación en halos (HOD) en el contexto del análisis de los datos del año 1 de DESI. En particular, hacemos este análisis para galaxias rojas luminosas (LRG), uno de los tipos de galaxias que DESI utiliza para sus estudios. Encontramos un límite superior para el error sistemático de HOD de $0,2\sigma_{\text{stat}}$ en la medida de la escala BAO, tanto a lo largo de la línea de visión como perpendicular a la misma. Futuros trabajos nos permitirán estimar este resultado con mayor precisión y estudiar su efecto al combinarse con las otras fuentes de errores sistemáticos de DESI.

Tesis disponible en:

https://drive.google.com/drive/folders/1KnvgQmWLwzL7P9mrTufEi9uOU_QMu2Kz?usp=share_link



Contornos en h , Ω_m y σ_8 para el análisis del año 3 de DES, marginalizando en todos los demás parámetros. En amarillo se muestran los resultados de la combinación de $3\times 2pt$ y supernovas (SN) y en negro incluimos, también, el BAO. Encontramos que los contornos reducen su tamaño al incluir nuestra medida de BAO, incrementando el poder de restricción de DES.

Calar Alto celebra su 50 aniversario
disfrutando de un espectáculo celeste.
Créditos: Luís Saracho Martínez.



**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