

# PARALAJES

nº 1 2023

La revista del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)



**EL INFRARROJO**  
más allá del arcoíris

**ASTROFÍSICA**  
en luz infrarroja

ventana  
**INFRARROJA**

**TELESCOPIOS/  
INSTRUMENTOS**  
infrarrojos

el infrarrojo  
en el **ESPACIO**

**CARLOS SÁNCHEZ MAGRO**  
un pionero

**EL INFRARROJO**  
en otros contextos

# PARALAJES

Nº1 2023

*Paralajes* es una publicación editada por la Unidad de Comunicación y Cultura Científica (UC3) del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC).

**Dirección:** Rafael Rebolo.

**Coordinación y redacción:** Carmen del Puerto, Ángel Gómez Roldán y Alfred Rosenberg.

**Colaboradores:** José Acosta, Carlos Allende, Gloria Andreuzzi, Natalia Arteaga, Marc Balcells, Eduardo Battaner, Mary Barreto, John Beckman, Antonio L. Cabrera Lavers, Julio A. Castro Almazán, Jorge Casares, Nieves Castro Rodríguez, Patricia Chinchilla, Manuel Collados, Christopher Cooperwheat, Romano Corradi, Abelardo Díaz, Anlaug Amanda Djupvik, Francisco Garzón, Adriano Ghedina, Esteban González, Jonay González Hernández, Oswaldo González, Artemio Herrero, Susana Iglesias Groth, Anthony W. Jones, Jesús Jiménez Fuensalida, Iván Jiménez, Julia de León, Javier Licandro, Nira Llavrena, Nicolas Lodieu, Pablo López, Roberto López, Antonio Mampaso, Arturo Manchado, Javier Méndez Álvarez, Teo Muñoz, Casiana Muñoz Tuñón, Álex Oscoz, Enric Pallé, José Peña, Ismael Pérez Fournon, Ennio Poretti, Mercedes Prieto Muñoz, Cristina Ramos Almeida, Gara Ramos, Pablo Redondo, Nayra Rodríguez Eugenio, Alfred Rosenberg, José Alberto Rubiño Martín, Alejandra Rueda, Víctor Sánchez Béjar, Francisco Sánchez Martínez, Javier Sánchez Sierras, Anselmo Sosa, Iain Steele, Hristo Stoev, Alejandro Suárez Mascareño y Olga Zamora.

**Fotografías y composiciones artísticas:** Inés Bonet, Pablo Bonet, Miguel Briganty, Lara Infante, Daniel López, Pablo López, Elena Mora, Jesús Patrón, Gabriel Pérez, Equipo GTC, Rafael Vilela. También ESA, ESO, NASA y autores.

**Diseño:** Carmen del Puerto e Inés Bonet.

**Administración:** Jesús Burgos, Delia García, Aloys García, Airam Gómez, Elena González Álvarez, Yesyka Hernández, Nátaly Mestres, Ana Quevedo y Yolanda Zamora.

**Portada:** imagen infrarroja de la galaxia elíptica Maffei 1, obtenida con EMIR en GTC. © GTC.

**Contraportada:** primera imagen profunda del Universo tomada por el telescopio espacial infrarrojo James Webb de la NASA. © NASA, ESA, CSA y STScI.

**Depósito Legal:** TF 414-2023

**ISSN:** 2444-8990

# ÍNDICE

EDITORIAL: El infrarrojo .....	5
Más allá del arcoíris .....	6
James Clerck Maxwell. El padre del electromagnetismo .....	7
Más allá del color rojo: 30 años después .....	8
Astrofísica en luz infrarroja .....	12
El infrarrojo. Las otras caras del Universo .....	18
Galaxias en el infrarrojo .....	24
Formación tardía de galaxias tempranas .....	28
GOYAPh. Cartografiado fotométrico para el estudio de galaxias lejanas en el Universo .....	31
Estrellas y blázares en el infrarrojo .....	34
Observando agujeros negros en el infrarrojo .....	36
El "apogeo" de la espectroscopía estelar en el infrarrojo .....	38
El Sol. Espectropolarimetría solar en el infrarrojo cercano .....	40
Los pequeños cuerpos del Sistema Solar en el infrarrojo .....	44
La esfera de vapor y la ventana infrarroja .....	48
Colector de flujo infrarrojo. De prototipo de pruebas a telescopio permanente .....	52
Grandes telescopios terrestres infrarrojos .....	57
El Telescopio Carlos Sánchez TCS .....	58
Algunos resultados con el TCS .....	64
Las enanas marrones, las enanas más "infrarrojas" .....	66
La primera tesis y la primera tesina con CAIN .....	68
La colisión del Shoemaker-Levy con Júpiter. El "Cometazo" .....	70
Observaciones en el infrarrojo cercano en el ING .....	72
LIRIS: 20 años de espectrografía infrarroja en un gran telescopio .....	75
La primera tesis con LIRIS .....	77
Algunos resultados con LIRIS .....	78
El infrarrojo con el TNG .....	80
El infrarrojo con el NOT .....	82
El telescopio Liverpool y el infrarrojo .....	84
Gran Telescopio Canarias (GTC). El mayor telescopio óptico e infrarrojo del mundo .....	88
Algunos resultados con CanariCam .....	92
Viaje al interior de EMIR .....	94
"El viaje del elefante" .....	100
EMIR, momento de fin y principio .....	102
Algunos resultados con EMIR .....	104
El desafío de las bajas temperaturas y la evolución tecnológica del IAC .....	106
Instalaciones del IAC para desarrollo de instrumentos infrarrojos .....	108
Desarrollo actual de instrumentación infrarroja en el IAC .....	110
FRIDA, MIRADAS, HARMONI, GRANCAIN, ANDES, NISP, Small-ELF, NIRPS	
Pequeños planetas alrededor de estrellas pequeñas. Buscando exoplanetas por medio de luz infrarroja .....	119
Telescopios espaciales IR .....	120
El ISOPHOT-S. Un viajero al universo invisible .....	124
El IAC y el Observatorio infrarrojo Herschel (PACS y SPIRE) .....	126
El misterio de las galaxias rojas 'muertas' .....	128
La contribución de Planck al infrarrojo .....	130
Moléculas precursoras de la vida en la Nube de Perseo .....	132
El telescopio espacial James Webb .....	134
Contribuciones científicas del IAC con el James Webb .....	136
CARLOS SÁNCHEZ MAGRO. Pionero de la astronomía infrarroja .....	138
"Estrellas" del infrarrojo. Apuntes de una vida. Resumen de contribuciones. El primer mapa estelar profundo en infrarrojo de nuestra galaxia. Galaxias externas en el IR. Otras contribuciones de Carlos Sánchez Magro y sus colaboradores a la investigación infrarroja. "La astrofísica es teórica y observacional, pero necesita instrumentos". Su importancia en el desarrollo de la astrofísica española. Un adelantado en fotometría infrarroja. Un genio poliédrico	
IACTEC-Espacio. DRAGO: Observando la Tierra en el infrarrojo .....	156
El volcán de Cumbre Vieja. Primeras imágenes de Drago-2	
IACTEC. Tecnología médica .....	162
El infrarrojo y la divulgación .....	166
"El fantasma de la luz". Módulo del Museo de la Ciencia y el Cosmos .....	167



Retrato del astrónomo William Herschel, realizado en 1785 por Lemuel "Francis" Abbott y expuesto en la National Portrait Gallery de Londres. Public domain, via Wikimedia Commons

## El infrarrojo

El Universo emite la mayor parte de su energía en el infrarrojo (IR) y, por tanto, es un universo casi invisible, que apenas vemos. El cuerpo humano siente la radiación infrarroja como calor, pero no somos capaces de percibirla con los ojos. Sin embargo, a principios del siglo XIX, sir William Herschel -indiscutible protagonista en este número de *Paralajes*- anunciaba el descubrimiento de una luz invisible que rompía los oculares cuando observaba el Sol. Hoy, la radiación infrarroja, que tan molesta resultaba a este astrónomo inglés, se relaciona tanto con estrellas que nacen y mueren como con los límites del Universo. Además, al ser una radiación que sufre menos extinción en su viaje, podemos ver con ella lo que esconden las densas nubes de polvo en el espacio. El infrarrojo nos permite acceder a un aspecto prohibido o invisible de la realidad, traspasando la frontera de lo desconocido.

El Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) ha sido consciente desde sus inicios de la importancia de estudiar la radiación infrarroja que nos llega del Cosmos y desarrollar la instrumentación necesaria para ello. La propia historia del centro se halla en parte ligada a esta zona del espectro, como se podrá comprobar en estas páginas. Una de las primeras instalaciones en los Observatorios de Canarias fue un telescopio infrarrojo, llamado posteriormente Telescopio Carlos Sánchez, con el que se hicieron algunas de las primeras tesis doctorales de investigadores del IAC, hoy expertos en astrofísica infrarroja. En nuestra memoria siempre estará el astrofísico Carlos Sánchez Magro, quien da nombre al telescopio, un pionero en investigación e instrumentación infrarroja que no

pudo llegar a ver la herencia de todo su trabajo por fallecer prematuramente. Otro protagonista evidente en este número de *Paralajes*.

A la incuestionable calidad del cielo de los Observatorios de Canarias, que cuentan con el GTC (Gran Telescopio Canarias), el mayor telescopio óptico e infrarrojo del mundo, se añaden unas condiciones excepcionales también para observaciones infrarrojas. No obstante, para ampliar nuestra visión en este rango, salimos al espacio, pues en la Tierra la atmósfera que respiramos y que nos protege del Sol nos oculta a su vez la mayor parte de este universo infrarrojo. Y, de nuevo, el IAC estuvo ahí. El observatorio infrarrojo ISO, junto con el observatorio solar SOHO, fueron los primeros satélites en los que España participaba con instrumentación científica. El IAC lideró esa participación, con la financiación entonces del Programa Nacional del Espacio de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT). En palabras del director fundador del IAC, Francisco Sánchez, "este hito científico y tecnológico supuso un salto notable en el camino de la convergencia con los países más desarrollados, ejemplo de trabajo en común entre un centro de investigación -el IAC- y empresas de tecnología avanzada."

La instrumentación para detectar y analizar la luz en el rango infrarrojo del espectro ha sido y es, por tanto, uno de los campos de conocimiento obligado tanto del Área de Instrumentación del IAC, que tiene una larga historia de participación internacional en el diseño y

construcción de cámaras y espectrógrafos infrarrojos, todos ellos muy productivos, como de nuestro espacio tecnológico y empresarial IAC/TEC. Estos instrumentos requieren de tecnologías del alto vacío y criogenia y abarcan las especialidades de ingeniería mecánica, óptica, electrónica e informática, entre otras. Y tanto para telescopios en tierra (CAIN, LIRIS, CanariCam, EMIR, MIRADAS, FRIDA, GTC/O, HARMONI, GRANCAIN, ANDES, NIRPS, Small-ELF...) como para misiones espaciales (ISOPHOT-S para el ISO; PACS, SPIRE y LFI para el Herschel/Planck, NISP para Euclid), participando en grandes consorcios internacionales.

A nuestras contribuciones para telescopios tanto de los Observatorios de Canarias como del mundo y misiones espaciales, incluido el James Webb, con el que ya estamos obteniendo resultados impresionantes, se suma utilizar nuestra experiencia en otros contextos, como la observación de la Tierra con las cámaras DRAGO 1 y 2, que nos están proporcionando imágenes espectaculares, la tecnología médica o la divulgación.

Proyectos científicos y tecnológicos que no habrían sido posibles sin el siempre excelente trabajo de nuestro personal administrativo, que debe gestionar todos los proyectos.

De todo ello se habla con orgullo en esta revista.

RAFAEL REBOLO,  
director del IAC

# Más allá del arcoíris

## Espectro Electro-Magnético...

... sí, así, con una leve pausa entre electro y magnético. Pocos términos científicos causan tanto terror entre la población en general. Sin embargo, se trata de algo de lo más común: luz. Y para alguien que se dedique a la astrofísica, la luz (su presencia o no) lo es todo. Es casi la única fuente de información de que dispone para realizar su trabajo.

Es curioso que, para ser algo que nos rodea a diario, nos resulte tan poco intuitiva. Entre las cosas que hemos ido aprendiendo sobre la luz podemos citar su extraordinaria, aunque finita, velocidad (redondeando, unos 300.000 km/s en el vacío) lo que inevitablemente nos limita a observar un universo relativo siempre asociado a un pasado, más remoto cuanto más lejos miremos. Por otro lado, su dualidad onda-corpúsculo, que viene a decir que, según el experimento que realicemos, la luz se comportará como una onda o como una partícula. En cualquiera de los dos casos, no deja de sorprendernos: como partícula la denominamos fotón, y ¡no tiene masa!; como onda se comporta también de forma extraordinaria, ya que se propaga sin necesidad de medio físico. De hecho, alcanza su velocidad máxima ¡en el vacío!

Puestos a señalar características asombrosas, cabe decir que existen muchos tipos de luz, una pequeña parte visible y la gran mayoría invisible a nuestros ojos, pero que en conjunto es lo que denominamos “espectro electromagnético”. Cualquier característica sobre la luz parece tan poco intuitiva que no es de extrañar el tiempo

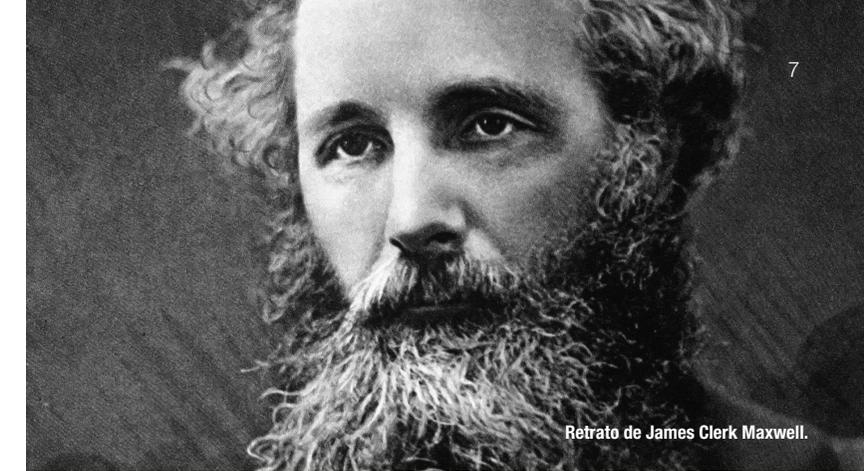
que hemos tardado en comenzar a entenderla. El espectro electromagnético no es más que el conjunto de todos los tipos de luz que existen y cuyo comportamiento es descrito por cuatro simples ecuaciones, publicadas por primera vez por James Clerk Maxwell en 1865.

A los seres humanos (al menos a algunos) les gusta ordenar las cosas, y la luz puede ser ordenada según varias de sus propiedades, si bien todas ellas relacionadas entre sí. Si nos centramos en el rango visible del espectro electromagnético, descubrimos el arcoíris, un continuo de colores que va del rojo profundo al violeta, pasando por el amarillo y el azul. Cada color, cada tipo de luz, se corresponde con una longitud de onda, una frecuencia y una energía muy precisa. El arcoíris está ordenado según cualquiera de estos parámetros. Los fotones rojos son menos energéticos, poseen una frecuencia menor y una longitud de onda mayor que, por ejemplo, los azules.

Pero la luz no acaba donde lo hace nuestro limitado sentido de la vista. A ambos lados del arcoíris existe un universo de colores invisibles muchísimo mayor. De una manera un tanto arbitraria, este es dividido en siete rangos principales, con subdivisiones posteriores. El rango central es el visible, definido como aquel que podemos detectar con nuestros ojos. A ambos lados encontramos los rangos denominados (con gran originalidad) infrarrojo y ultravioleta, haciendo referencia a la luz más allá del rojo y del violeta, respectivamente. Tras el ultravioleta, les siguen los rayos X y rayos gamma, mientras que, hacia el lado opuesto, tras el infrarrojo, tenemos el rango de las microondas y las ondas de radio.

La luz puede ser interpretada como un tipo de partícula fundamental, el fotón, a la que se le asocia una energía muy precisa. En el espectro electromagnético, la luz se distribuye según la energía de cada fotón asociado, existiendo una diferencia extraordinaria entre unos y otros. La energía de un fotón visible es muy poca, pero enorme, comparada con un fotón en radio, o ínfima, con uno de rayos gamma. Haciendo un símil macroscópico, podemos imaginar la energía de un fotón en el rango visible

El espectro electromagnético. © Gabriel Pérez (SMM, IAC)



Retrato de James Clerk Maxwell.

## JAMES CLERK MAXWELL El padre del electromagnetismo

Una monumental estatua en Edimburgo le rinde homenaje. El científico James Clerk Maxwell nació en esta ciudad escocesa en 1831 y ya desde pequeño apuntaba maneras. Con 15 años inventó el método que consistía en trazar una elipse con un cordel y unos alfileres. Con 18 demostró que todos los colores se derivan de los colores primarios (rojo, verde y azul). En 1861 obtuvo la primera fotografía en color: un jirón de tartán, la típica tela escocesa con estampado de cuadros. Observó los anillos de Saturno y demostró que estaban compuestos de enormes cantidades de pequeñas partículas en órbita, y lo hizo antes del viaje de las sondas espaciales Voyager, que sobrevolaron el planeta. Junto con su esposa, la física Katherine Mary Dewar, descubrió que la viscosidad de un gas es independiente de la presión a una temperatura determinada (teoría cinética de los gases). Logró sintetizar electricidad, magnetismo y óptica en una única teoría que demostró con cuatro ecuaciones matemáticas (teoría electromagnética). Estas ecuaciones describen la naturaleza de los campos electromagnéticos en términos de espacio y tiempo. Fue toda una revolución de la que derivan nuestras tecnologías actuales. Maxwell predijo la existencia de las ondas electromagnéticas propagándose, a la velocidad de la luz, por una hipotética sustancia material, para la que se usó el término aristotélico “éter” (y en esto último se equivocó, pues hoy sabemos que se propagan en el vacío). Además, concluyó que la luz era una onda electromagnética y que la luz que vemos representa una pequeña región del espectro. Pasó por las universidades de Edimburgo, Cambridge, Aberdeen y Londres. Ocupó la prestigiosa cátedra Cavendish de Física Experimental en Cambridge, donde abrió su laboratorio en 1874. Murió de cáncer a los 48 años. Su *Teoría dinámica del campo electromagnético* (1873) sigue siendo una referencia. Según la BBC, es el Einstein olvidado de Escocia.

como la que tiene una piedra a un metro de altura. Si la soltamos, chocará con cierta fuerza contra el suelo. En comparación, en el rango infrarrojo sería como soltar la piedra desde unos centímetros, y en el de las ondas de radio, unas micras. En los rangos cada vez más energéticos, como los rayos X y rayos gamma, se corresponderían con una altura de kilómetros y cientos de kilómetros, respectivamente. La diferencia de energía entre unos y otros es abismal.

A partir de una cierta energía, la luz puede resultar letal para la vida, ya que puede arrancar los electrones de los átomos y romper moléculas. Es la denominada radiación ionizante, que comprende parte de la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. Afortunadamente nos encontramos en un planeta dotado de dos escudos fundamentales: la atmósfera y el campo magnético terrestre. Ambos nos protegen de la radiación ionizante y de las partículas cargadas que nos llegan del Universo. Pero, inevitablemente, nos impiden observarlo en estos rangos del espectro. Por ello, el infrarrojo, las microondas y las ondas de radio han sido, tras el visible, los rangos del espectro más desarrollados en la observación del Universo desde la Tierra.

Desde el punto de vista tecnológico, el rango infrarrojo del espectro electromagnético ofrece muchas ventajas e inconvenientes. Podemos observar con telescopios muy similares a los utilizados en el visible, construir detectores bidimensionales que nos ofrecen mapas de temperaturas que podemos confrontar con las imágenes visibles, pero debemos mantener los detectores en condiciones criogénicas. Además, casi todo lo que nos rodea introducirá “ruido” en nuestros datos (la atmósfera, nuestros espejos del telescopio, nuestro detector...).

Sin embargo, el infrarrojo nos permitirá adentrarnos en lugares ocultos al visible, tales como nebulosas de polvo y gas (para estudiar estrellas en su fase inicial de formación) o medir las órbitas de estrellas que giran en torno al agujero negro supermasivo situado en el centro de nuestra galaxia, oculto tras nubes de polvo y gas que pueblan el disco de la Vía Láctea.

El Instituto de Astrofísica de Canarias ha realizado una labor muy destacada en el estudio del Universo en el rango infrarrojo del espectro electromagnético, desarrollando instrumentación y técnicas que han permitido avanzar en el estudio del Cosmos, lo cual tratamos de mostrar en este número de *Paralajes*.

ALFRED ROSENBERG,  
astrofísico divulgador del IAC

# Más allá del color rojo: 30 años después

Aunque ustedes no lo sepan, en 1992 tuvo lugar una mítica Escuela de Invierno en el IAC. Fue la cuarta de la serie y estuvo dedicada a la astronomía infrarroja. Digo mítica por ser la pionera dedicada al infrarrojo y porque el libro de la editorial Cambridge University Press, que recogió sus contenidos, ha sido una referencia durante todos estos años. La parte divulgativa de la Escuela consistió en una edición especial del Boletín IAC NOTICIAS, que incluía artículos de opinión, entrevistas a los profesores y una introducción escrita por el que esto firma cuando tenía, eso sí, treinta años menos. Una introducción estupenda, dicho sea sin ninguna imparcialidad. La titulé "Más allá del color rojo", y ya ven que lo he copiado y pegado en el título del artículo actual. Copia sobre copia, porque la hermosa frase «beyond the colour red» viene del mismísimo William Herschel, que vaya usted a saber si lo copió de alguien antes. Creemos que no, y sir William ha pasado a la historia como descubridor del infrarrojo. Lo que él llamó «rayos caloríficos», ese algo misterioso e irritante que rompía sus oculares al observar el Sol, fue otra de sus monumentales contribuciones a la ciencia; también descubrió el planeta Urano. Estaba allí en el momento justo, experimentando con sus prismas y sus termómetros, midió, pensó y lo encontró. Cosas de los genios.

Treinta años. Mucho ha llovido desde... ¡es broma! No se preocupen que no voy a decir eso. Lo que voy a hacer es actualizar un poco aquel artículo mío, más que nada porque no lo encuentro en internet... stop, ¿han oído? Google es 100% ignorante de ese artículo. No me quiero desviar del tema, pero yo creo que eso le da un valor incalculable. Bueno, decía yo entonces, y digo ahora, que la ventana infrarroja, la zona del espectro que va desde unas 0,8 hasta unas 500 micras en longitud de onda, es unas 2.500 veces más ancha que la ventana visible. Quería provocar el «dios mío, todo lo que no vemos» que tan necesario es para que la gente siga leyendo. Pero es que, por esa ventana infrarroja, en aquel entonces, no se veía casi nada: nada en profundidad, nada con la nitidez del rango óptico y nada con su detalle (me refiero al detalle espectral, la resolución en longitud de onda de los instrumentos). Me lamentaba de que la ventana era demasiado ancha y desconocida: no había detectores panorámicos, ni observaciones detalladas de nada, teníamos solo programas engorrosos y rudimentarios de análisis de datos y faltaba teoría por todos lados, desde atmósferas planetarias hasta las galaxias infrarrojas ultraluminosas que acababan de descubrirse. En justicia, no «me lamentaba» de nada, más bien animaba a los jóvenes a adentrarse en ese mundo tan desconocido del infrarrojo.

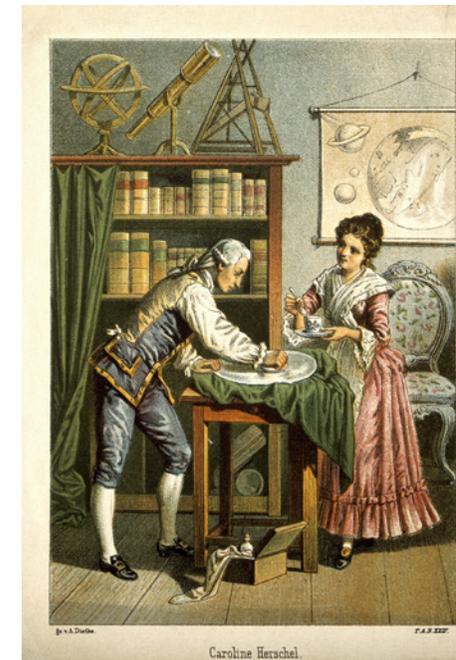


Cartel de la IV Escuela de Invierno del IAC, dedicada a la astronomía infrarroja. © Narciso Hernández/IAC

El infrarrojo (IR) siempre ha sido para mí una frontera, una frontera extraña, no hacia afuera, sino aprisionada entre dos mundos mucho mejor conocidos, el rango óptico y el de radio. La frontera linda en su lado «azul», el de longitudes de onda más cortas, con el óptico: es el llamado «infrarrojo cercano y medio» y es el lado fácil. Se usan detectores de estado sólido (tipo los CCD de nuestras cámaras, pero con diferentes materiales) y la atmósfera se deja penetrar por la radiación en ciertas «ventanas» atmosféricas. De pasada diré que los astrónomos perdimos una ocasión magnífica de hacer poesía al poner nombres a esas ventanas infrarrojas. Imagínense ustedes: se descubre un mundo nuevo, un universo inexplorado, algo que se deja entrever apenas a través de pequeñas rendijas en el espectro... ¿es que a nadie se le ocurrió nada mejor que llamar a esas ventanas I, Z, J, H, K, L, M, N y Q? Anaranjado, violeta, verde, añil; eso sí es poesía... y ya puestos, ¡ni siquiera orden alfabético en esa sopa de letras! Además, pase que no esté la Ñ, pero ¿dónde está la P? ¿está perdida, proscrita, prohibida? El otro extremo de la frontera, la zona «roja» de ondas más largas que linda con las submilimétricas de radio, es también relativamente fácil, porque ahí se usan detectores y técnicas muy eficientes que se desarrollaron para la radioastronomía, y, además, porque es barato hacer telescopios muy grandes (50 metros de diámetro y más). En medio, digamos entre 30 y 300 micras de longitud de onda, el infrarrojo sigue siendo la cámara de los horrores. Detectores pequeños, atmósfera intratable, emisión de fondo (y su ruido asociado) enorme, complicadas técnicas de enfriamiento y de vacío, y, encima de todo ello, todo, y todos, emitimos generosamente billones de fotones infrarrojos que enmascaran a los escasos fotones que vienen genuinamente del astro a estudiar. Ni siquiera el nuevo telescopio espacial James Webb (JWST), que ha huido millón y medio de kilómetros para escapar de la atmósfera y de nosotros, se atreverá en ese terreno pantanoso más allá de las 30 micras. Ánimo, jóvenes astrofísicos que me escuchan, ahí está hoy la frontera.

## DATOS PÚBLICOS

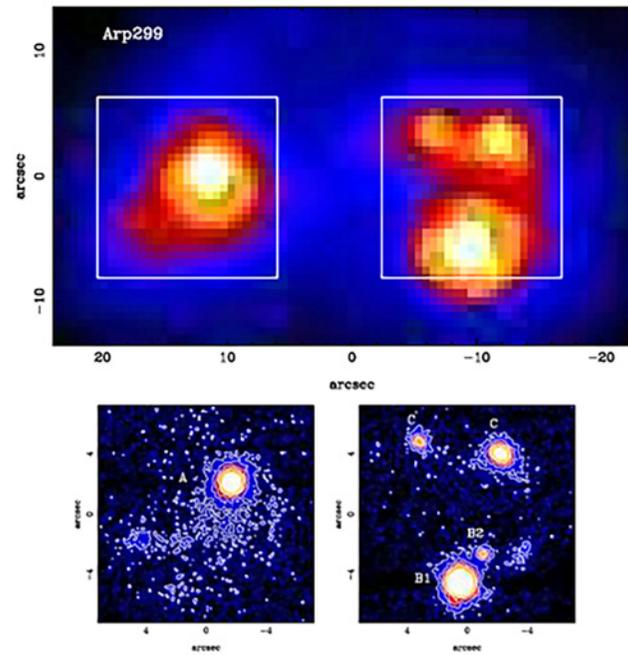
Estamos a mitad de artículo y aún no he dicho ni palabra de cómo ha avanzado la astronomía infrarroja desde 1992. Es que ha sido mucho y me da pereza relatar todo. Y además está en la Wikipedia. Ustedes me disculparán si lo resumo, abusando además de acrónimos. Miren, en 1992, el IAC estaba muy orgulloso de participar con un instrumento en el primer observatorio espacial infrarrojo (llamado ISO). Les ahorro lo bien que fue y lo valiosos que fueron sus datos (que aún se usan). Pero es que, después de ISO (1996), ha venido la época dorada de las misiones infrarrojas. Han volado telescopios infrarrojos a bordo de aviones estratosféricos (los observatorios KAO y SOFIA) y se han lanzado con éxito una pléyade de misiones infrarrojas SWAS, MSX, AKARI, SPITZER, WISE y HERSCHEL. Cada una de



William Herschel, descubridor de la radiación infrarroja, y su hermana Carolina, destacada astrónoma, aunque menos conocida. En el grabado de 1896 de A. Diethel, él pule el espejo de un telescopio y ella añade el abrasivo. © Wellcom Collection Gallery

esas siglas esconde un mundo de datos por explorar. Yo uso especialmente los datos de WISE, un cartografiado profundo de todo el cielo en infrarrojo cercano y medio. Y ahora viene lo importante: todos los datos son públicos, no solo para astrónomos, sino para el que los quiera. Tenemos que defender que eso siga siendo así, mejorarlo incluso haciendo que no solo los datos «crudos» sean libres, sino también los procesados, los que están listos para ser analizados por cualquier astrónomo del mundo. Es lo que hace a nuestra ciencia, la astrofísica, única. Ningún laboratorio de biología o química, de investigación farmacéutica o de lo que sea, deja usar sus instalaciones a otros, y menos aún a la gente. Pero el cielo es de todos y los datos que los profesionales obtienen de él, también.

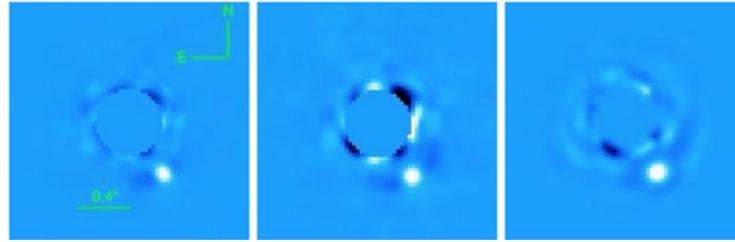
A lo mejor, la lista de todas aquellas misiones espaciales infrarrojas no les suena, pero seguro que sí han oído hablar del telescopio espacial Hubble. El veterano HST (de sus siglas en inglés) lleva también instrumentación en el infrarrojo cercano. Y su heredero, el James Webb, un gigante de 6,5 m que se lanzó en diciembre de 2021, resulta que solo es sensible desde el rojo (0,6 micras) hasta el infrarrojo medio (28 micras). Han oído bien: adió a las bellas imágenes de galaxias y nebulosas en el ultravioleta o en las líneas azules y amarillas de emisión. Hola a un aluvión de otras imágenes maravillosas, todas ellas «más allá del color rojo». Búsquenlas en la red o en las portadas de los diarios, las agencias espaciales las publicitan muy bien.



Imágenes infrarrojas del sistema de dos galaxias en interacción Arp 299. Arriba, las imágenes del telescopio espacial Spitzer tomadas en la longitud de onda de 8 micras (1 micra es igual a una milésima de milímetro) y abajo, las tomadas con el Gran Telescopio Canarias (GTC) y el instrumento CanariCam, equipado con un filtro infrarrojo en 8,7 micras. Este filtro muestra la emisión de los granos de polvo compuestos por silicatos. Nótese la fantástica nitidez de las imágenes del GTC gracias a la cual se pueden estudiar en detalle los distintos componentes del sistema. Todos los colores mostrados (amarillos, rojos, naranjas y azules) son, por supuesto, falsos, y se han elegido para resaltar las distintas intensidades de la radiación infrarroja que emiten las galaxias (a la que somos totalmente ciegos los humanos). © Alonso-Herrero et al. (2016), MNRAS 463, 2405

En cuanto a telescopios en tierra dedicados al infrarrojo... la verdad, no estamos para que nos hagan la ola. Me explico: tenemos todavía, renqueantes, los pioneros de la década de los 70 repartidos por el mundo, el Telescopio Carlos Sánchez TCS, del Observatorio del Teide (Tenerife), con un espejo de 1,5 m (inaugurado en 1972), WIRO, de 2,3 m (1977), en EEUU, UKIRT, de 3,8 m (1978), e IRTF, de 3 m (1979), ambos en Hawái... y solo un telescopio infrarrojo nuevo, eso sí, el más grande, de 4,1 m: el telescopio VISTA, del ESO en Chile (inaugurado en 2008).

¿Por qué no se están haciendo más telescopios dedicados al infrarrojo? Porque los ópticos nos han robado la cartera (y no hablo de lo caro que resulta hacerse unas gafas). Todos los grandes telescopios ópticos incorporan ya instrumentación infrarroja, pues incluyen cámaras y espectrógrafos que llegan hasta el infrarrojo cercano, y algunos, caso de nuestro Gran Telescopio Canarias (GTC), hasta el infrarrojo medio. Dado que el GTC es el más



Los telescopios infrarrojos ya pueden ver en directo a unos pocos exoplanetas orbitando alrededor de sus estrellas. Las tres imágenes son del planeta Beta Pictoris-b, un gigante con 10-15 veces la masa de Júpiter que gira alrededor de la estrella Beta Pictoris. Está tomada con un telescopio de 8 m del ESO en Chile, usando tres filtros infrarrojos en 3,8, 4,0 y 4,8 micras, es decir, sensibles a objetos, como planetas, mucho más fríos que las estrellas. El planeta Beta Pictoris-b es el punto gordo blanco, abajo a la derecha, pero el hermoso anillo azul y negro es falso. Es un «artefacto» que sale al intentar eliminar la imagen de la estrella Beta Pictoris, que es millones de veces más brillante que el planeta. © Currie et al. (2013), ApJ 776,15).

grande del mundo, me permitirán que ponga unos cuantos datos. Me parecen muy significativos. Tomen nota de la lista de instrumentos propios, presentes y futuros, del GTC: OSIRIS 0,36-1 micras (2009); CanariCam 8-25 micras (2012); CIRCE 1-2,5 micras (2015), EMIR 1-2,5 micras (2017), MEGARA 0,4-1 micras (2017), FRIDA 1-2,5 micras (2023) y MIRADAS 1-2,5 micras (2023). Están listados por año de puesta en funcionamiento y los números, ya lo habrán adivinado, son el rango de longitud de onda donde trabajan. Decíamos que el infrarrojo empezaba más o menos en 0,8 micras, ¿verdad? Pues ya ven que, con la excepción de OSIRIS y MEGARA, todos son instrumentos puramente infrarrojos. Y, otra vez de pasada, habrán notado que los astrónomos se están poniendo las pilas inventando nombres, no vamos a decir que poéticos, pero sí algo más sugerentes para sus instrumentos.

### EXOPLANETAS Y MOLÉCULAS ORGÁNICAS

Para terminar por donde quizá debería haber comenzado: ¿para qué todo eso? ¿qué aprendemos del Universo observando en el infrarrojo? Es un mundo nuevo y fascinante, hay procesos que no tienen paralelo en otras zonas del espectro, y hay astros que solo sabemos que existen porque los vemos en infrarrojo. Voy a poner únicamente dos ejemplos:

- Planetas extrasolares. Hace treinta años no se conocía ninguno, la cuenta actual pasa de los cinco mil. Los astrónomos exo-planetarios extrapolan a todo el Universo y nos dicen que cada estrella de cada galaxia tiene, al menos, un planeta. Les apabullo aún más: se estima que hay medio billón de galaxias, al menos, en el Universo. Y una galaxia como la nuestra puede tener, al menos (lo de «al

menos» me encanta), medio billón de estrellas si incluimos a las estrellas más pequeñas, que también tienen derecho a tener planetas, y de hecho los tienen. Multipliquen: medio billón por medio billón, sale... un montón de planetas. Planetas con temperaturas muy bajas (comparado con las estrellas). Potentes emisores de luz infrarroja. Esperando que tengamos la tecnología para estudiarlos en detalle.

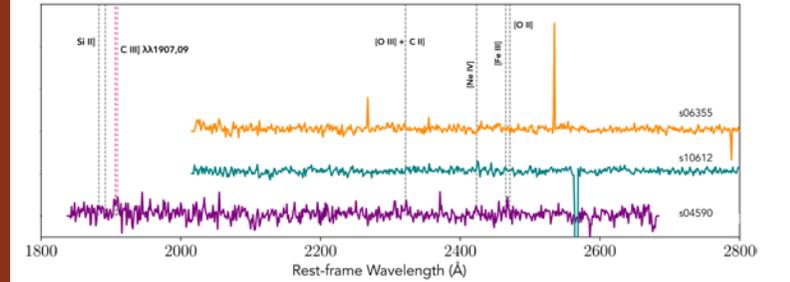
- Estrellas abundantes e insignificantes como el Sol. Evolucionan y devuelven al medio interestelar la mitad de su masa, pero ahora enriquecida en carbono y nitrógeno. Esas mismas estrellas luego forman nebulosas planetarias donde esos dos elementos, junto con el oxígeno, el hidrógeno y unos pocos más, se procesan y forman moléculas complejas. Pero no de cualquier manera. El carbono sigue siendo el rey de la química universal: de los 272 tipos diferentes de moléculas detectadas hasta la fecha en el espacio interestelar, 218 son orgánicas. Han oído bien, 218, es decir, el 80 %, contienen carbono. El Universo está inundado de moléculas orgánicas. Las más complejas como el amino-acetonitrilo hacen dar un brinco a los biólogos: es el precursor de la glicina, el aminoácido más sencillo en nuestros cuerpos.

Las moléculas interestelares con el récord de átomos de carbono son los Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAH, en inglés), interesante estudiarlas ¿verdad? Pues emiten intensamente en bandas características en el infrarrojo. Hace treinta años, los pioneros del infrarrojo les pusieron el discreto nombre de Bandas Infrarrojas No Identificadas; ahora son las Bandas PAH. Se han hecho imágenes en filtros infrarrojos sintonizados en esas bandas PAH y algún genio las codificó con el color rosa (hay que codificarlas para que las visualicemos; recuerden que somos ciegos al infrarrojo). Ya era hora, el color rosa. Pues tomen nota: el espacio interestelar es rosa. Busquen ustedes por ahí esas imágenes hermosísimas de nebulosas y galaxias que nos revelan estructuras repletas de moléculas orgánicas. Por todos lados.

Tendremos pronto una nueva generación de telescopios gigantes, los ingenieros y astrofísicos no paran de inventar nuevos detectores e instrumentos. El universo infrarrojo se va a revelar en todo su esplendor... y nada de eso servirá si no invitamos a los jóvenes a que se embarquen en ese viaje, si no les transmitimos, a ellos y a la gente, la emoción de descubrir y conocer.

Vamos con ello.

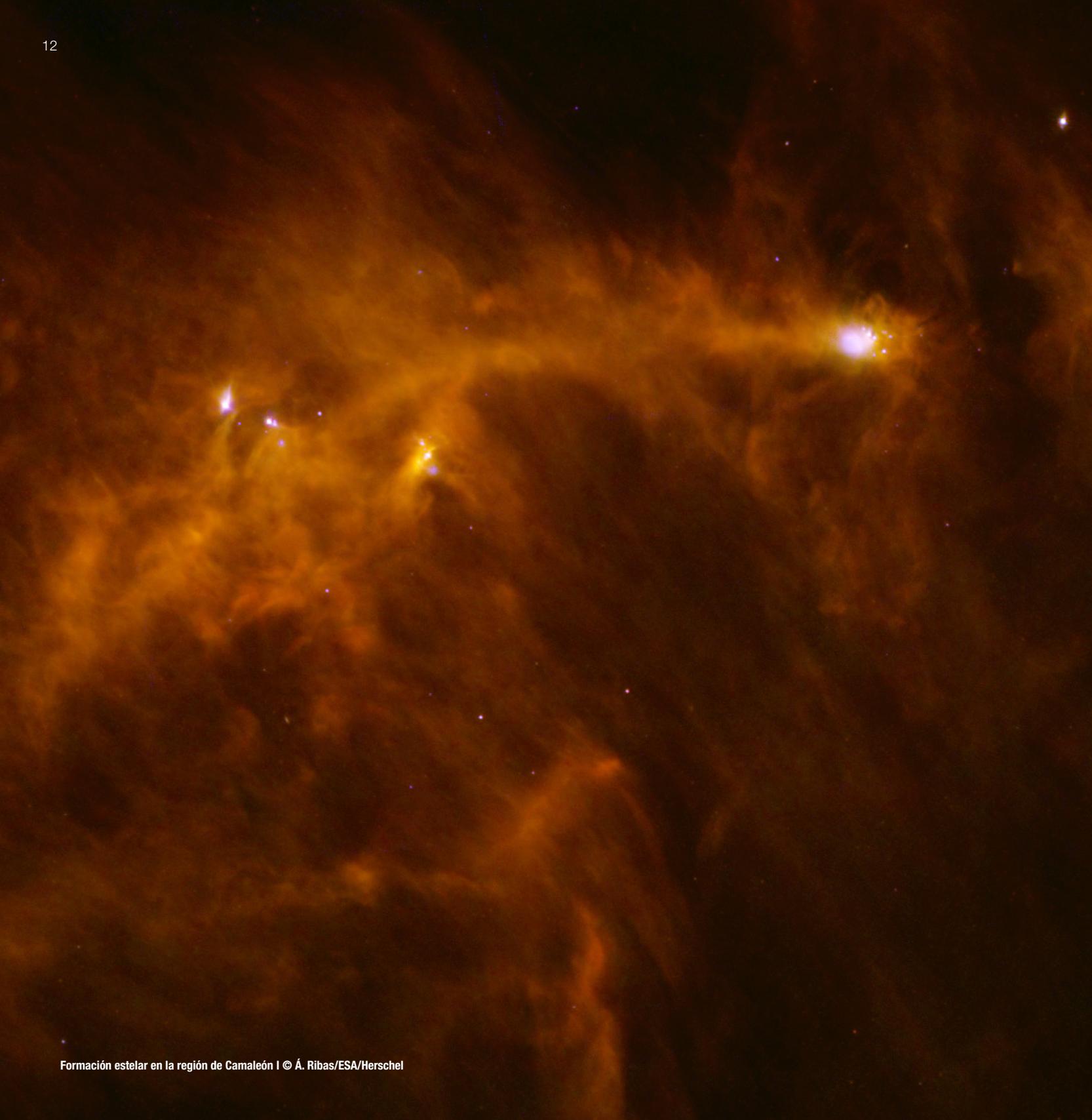
ANTONIO MAMPASO,  
astrofísico el IAC



La frontera hoy. Karla Arellano-Cordova -expostdoc del IAC y actualmente en la Universidad de Texas- presentó esta imagen en diciembre de 2022 al primer congreso sobre resultados del nuevo telescopio espacial JWST. No parece gran cosa, pero es impactante: muestra el espectro ultravioleta (observado en el infrarrojo por el JWST) de tres galaxias de alto *redshift* o desplazamiento al rojo, y en la llamada s04590, que es la que tiene mayor *redshift*,  $z = 8.5$ , se detectan, es verdad que a duras penas, dos líneas de carbono (etiquetadas como CIII] 1907 y 1.909 Ångstrom). Piénsenlo: ya había carbono en una galaxia formada apenas 600 millones de años tras el Big Bang, o sea, una galaxia que ahora tiene 13.200 millones de años. Si el carbono es la base de la vida y, si en «solo» 3.800 millones de años de evolución la vida en la Tierra ha llegado donde ha llegado, ¿cómo será en posibles planetas de esa galaxia, que estarán tres veces más evolucionados? © Arellano-Cordova et al. (2022), ApJL 940, L23



La vie en rose. Cuando se apunta al espacio interestelar con un telescopio equipado con un filtro infrarrojo sintonizado en una de las bandas de las PAH, se encuentra emisión por todas partes. Todo está lleno de moléculas orgánicas complejas. Esta fascinante imagen está tomada con el telescopio espacial Spitzer en una zona de nuestra galaxia llamada DR21, y muestra la emisión en la banda de 5,8 micras de las moléculas PAH, que parecen llenarlo todo. La emisión infrarroja se ha codificado con el color rosa. © A. Marston (ESTEC/ESA) et al., JPL, Caltech, NASA



# Astrofísica en luz infrarroja

Los objetos que componen el Universo emiten una fracción muy significativa, mayoritaria en muchos casos, de su energía en el rango infrarrojo, con una longitud de onda mayor de 800 nanómetros (0,8 micrómetros o micras) y hasta unas 500 micras, aunque los límites no son demasiado precisos. De ahí el interés de su estudio.

La radiación infrarroja fue descubierta por el astrónomo británico sir William Herschel alrededor del año 1800. Auténtico hombre de ciencia cuya influencia llega hasta nuestros días, Herschel investigaba la cantidad de energía que pasaba por los diferentes filtros de colores que usaba para observar el Sol. Diseñó diferentes experimentos y determinó que había una luz que se reflejaba, refractaba y absorbía de manera similar a la de la luz visible. La importancia de su descubrimiento fue, entre otras cosas, establecer que había luz, o energía, que el ojo humano no podía detectar.

## UNA EMISIÓN TÉRMICA

Con el tiempo, se fueron desarrollando técnicas para la medida de la radiación infrarroja, la mayoría de ellas basadas en el cambio de temperatura del receptor al ser expuesto a la luz. Hoy sabemos que la radiación infrarroja es una emisión básicamente térmica, esto es, emitida por los cuerpos materiales en razón de su temperatura, y característica de objetos fríos. Cuanto más frío esté el cuerpo, mayor será la longitud de onda donde se produce el máximo de su emisión térmica. Y al revés. A mayor temperatura del emisor, menor longitud de onda donde se emite la mayor parte de la energía. Así, la materia fría, como es la mayor parte de la materia ordinaria del Universo, emite el grueso de su energía en el infrarrojo, tanto más lejano cuanto más fría esté. Y la materia caliente, como las estrellas,

emiten más en las longitudes de onda más azules, que son precisamente las que puede captar el ojo humano. Es preciso señalar que, aunque la radiación infrarroja procede mayoritariamente de la emisión térmica de los objetos, en este rango hay también una rica variedad de líneas de emisión y absorción, provocadas por diferentes transiciones atómicas y moleculares, que permiten estudiar la composición química y otros aspectos de interés de los objetos de estudio.

Un aspecto importante en astronomía de la radiación infrarroja es que en el infrarrojo medio y lejano es donde se emite la mayor parte de la radiación del medio interestelar al ser calentado por la emisión de potentes estrellas masivas.

Otra característica relevante del rango infrarrojo la constituye el que el desplazamiento cosmológico al rojo de la emisión de objetos en los confines del Universo, producto de la expansión continua del mismo, hace que la energía que se emite originalmente en longitudes de onda menores, característica de fenómenos de muy alta energía, la midamos en el infrarrojo.

Y aún podemos añadir una razón más para justificar el interés del estudio del rango infrarrojo: la absorción de la luz por la materia que existe entre el objeto que la emite y la Tierra es mucho menor en el rango infrarrojo que en el visible, debido a la menor interacción radiación y materia en este rango, con lo que somos capaces de penetrar en regiones escondidas tras grandes masas de polvo, si observamos en el infrarrojo.

Por todo lo anterior, el interés por acceder a este rango del espectro ha sido grande casi desde el desarrollo de la moderna astrofísica observacional a finales del siglo XIX. Sin embargo, las dificultades técnicas eran y son formidables. El infrarrojo es una emisión térmica, propia de la temperatura de los objetos. Por ejemplo, un cuerpo a 20 grados emite la mayor parte de su energía



IRAS



ISO



SPITZER



HERSCHEL/PLANCK

IRAS © 1369th  
audiovisual  
squadron of the  
US Air Force

ISO © ESA

Spitzer © NASA

Herschel/Planck  
© ESA-CNES-  
Arianespace /  
Photo Optique  
Video CSG

térmica en 10 micras, y todavía emite una cantidad no despreciable a 1 micra. Si la temperatura es mayor, el máximo de emisión se desplaza a longitudes de onda menores, y a mayores si la temperatura disminuye. Eso implica que la instrumentación infrarroja deba situarse en entornos muy fríos, para disminuir la contaminación por la emisión del propio instrumento. Esos entornos se consiguen introduciendo el instrumento en vasijas al vacío, llamadas criostatos, dentro de las cuales se baja la temperatura hasta  $-100^{\circ}$ ,  $-200^{\circ}$  o incluso más frías. Por tanto, no se puede acceder al instrumento mientras está operando y hay que confiar en una exquisita puesta a punto del mismo antes de encerrarlo y enfriarlo.

Hay otro aspecto que hace difícil la observación infrarroja: la atmósfera terrestre es prácticamente opaca a esa radiación, absorbiéndola casi en su totalidad y dejando pasar solamente la energía situada en unas pocas ventanas espectrales. De ahí el interés por contar con sitios de observación altos y de atmósferas particularmente limpias y secas, como los cielos de las cumbres canarias, y la necesidad de situar instrumentos de observación infrarrojos en el espacio, donde puedan trabajar sin el impedimento de la atmósfera terrestre.

## MISIONES ESPACIALES

De hecho, la explosión de la astronomía en el infrarrojo sucede con ocasión de la primera misión espacial dedicada a observar el cielo en el infrarrojo: el satélite IRAS (*InfraRed Astronomical Satellite*). Lanzado en 1983, este pequeño satélite diseñado y construido conjuntamente por Estados Unidos, Reino Unido y Países Bajos, con un telescopio de sólo 57 cm de abertura, fotografió sin descanso el cielo en 4 bandas infrarrojas centradas en 12, 25, 60 y 100 micrómetros. Supuso un verdadero aldabonazo en la astronomía de la época al presentarle ante sus ojos un nuevo universo, más frío y denso de lo que se pensaba y con una enorme variedad de estructuras materiales no vistas anteriormente. IRAS aumentó el número de fuentes astronómicas catalogadas en un 70%, detectando alrededor de 350.000 nuevos objetos y revelando, por primera vez, el núcleo central de nuestra galaxia, oculto tras espesas nubes de gas y polvo.

Desde entonces, la astronomía infrarroja se ha desarrollado espectacularmente, apoyada por avances igualmente espectaculares en el campo de los

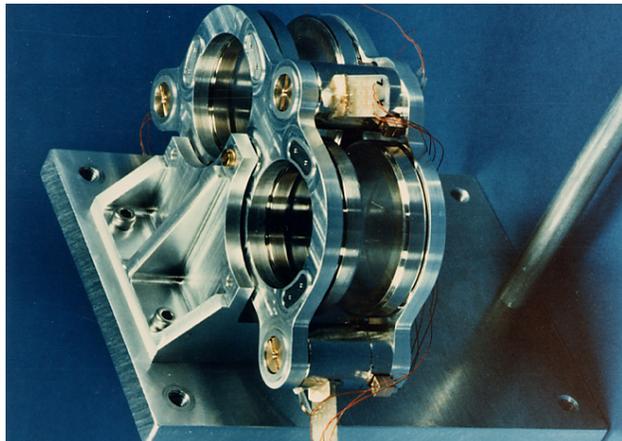


JAMES WEBB

James Webb © ESA/CNES/Arianespace

detectores de infrarrojo e instrumentación asociada. El éxito de IRAS dio pie a una misión de la Agencia Europea del Espacio (ESA), el observatorio espacial ISO, en el que participó el IAC con el diseño y la construcción del instrumento ISOPHOT-S, en lo que constituyó la primera participación instrumental española en misiones espaciales de la ESA. El satélite ISO se puso en órbita desde la base de Kourou de la ESA en abril de 1995, y observó el cielo en prácticamente todo el rango infrarrojo, desde los 2 a los 200 micrómetros, durante más de 2 años, según programas de observación propuestos y diseñados por prácticamente toda la comunidad astronómica mundial. Aún hoy, los resultados de la misión ISO se siguen utilizando.

En 2003 se puso en órbita el observatorio infrarrojo Spitzer, misión conjunta de la NASA y la ESA, y en 2009



Detalle del Instrumento ISOPHOT-S © IAC

se lanzaron los satélites Herschel-Planck, en el que también participamos desde el IAC. Por acabar con este repaso de las misiones espaciales, el sustituto del Telescopio Espacial Hubble, el James Webb, con su enorme espejo de 6,5 m, se puso en órbita en diciembre de 2021 y está dedicado en exclusiva a la observación infrarroja.

#### ESFUERZO INSTRUMENTAL

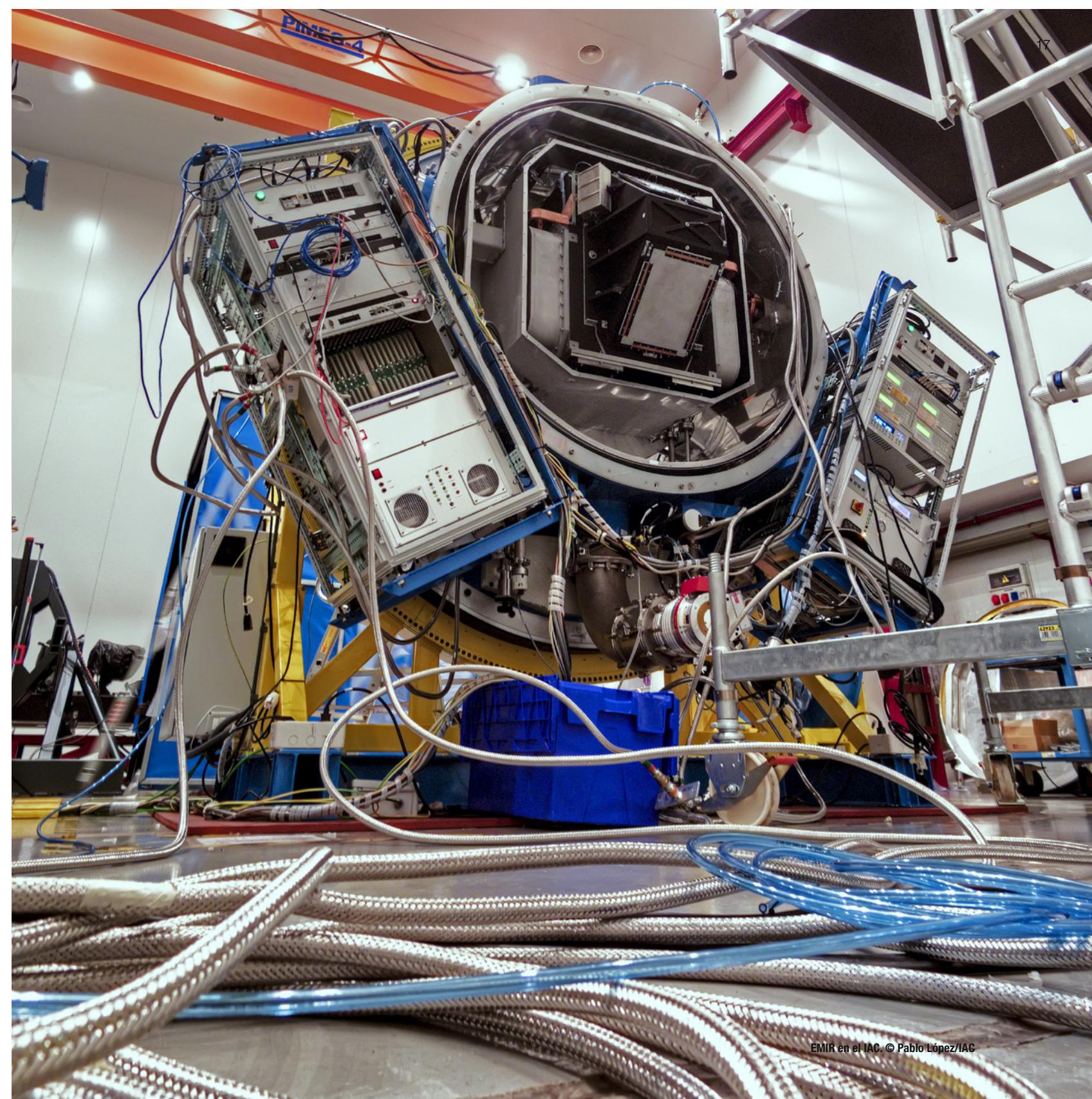
Como complemento a esta batería de observatorios espaciales, se lleva a cabo desde hace décadas un importante esfuerzo instrumental de los más importantes observatorios e instituciones astronómicas del mundo,

destinado a dotar a la comunidad de instrumentos cada vez más sofisticados de observación infrarroja. Desde el IAC participamos en esa tarea y estamos embarcados desde hace tiempo en el desarrollo de la capacidad tecnológica necesaria para acometer la construcción de instrumentación infrarroja avanzada. Esa tecnología es especialmente novedosa en dos áreas básicamente: la criogenia o capacidad para trabajar a temperaturas del entorno de 200 grados centígrados bajo cero; y el control y lectura de mosaicos detectores infrarrojos, que también trabajan en esos entornos tan fríos. Como resultado de nuestro esfuerzo contamos en los Observatorios de Canarias con la cámara infrarroja CAIN, que equipaba el Telescopio Carlos Sánchez, del Observatorio del Teide; el espectrógrafo infrarrojo LIRIS, en servicio en el Telescopio William Herschel, en el Observatorio del Roque de los Muchachos; y, más recientemente, el espectrógrafo multiobjeto infrarrojo EMIR, para el Gran Telescopio Canarias (GTC). También, grupos de investigación del IAC están involucrados en el desarrollo de MIRADAS, espectrógrafo IR de alta resolución para el GTC que está actualmente en la fase de puesta a punto en el telescopio, así como otros instrumentos en desarrollo, como GRANCAIN y FRIDA. Toda esta batería de instrumentos sitúa a los Observatorios de Canarias, y al IAC, en la vanguardia internacional de la observación infrarroja.

El acceso a las observaciones infrarrojas desde los Observatorios de Canarias ha dado lugar a contribuciones científicas novedosas e interesantes. Así, por ejemplo, el cartografiado TMGS (*Two Micron Galactic Survey*) constituyó en su momento el mapa más profundo y extenso del contenido estelar de las regiones centrales de nuestra galaxia, lo que nos dio pie para establecer la hipótesis de la existencia de una gran barra central en la Vía Láctea, ampliamente confirmada con observaciones posteriores. La continuación de este trabajo, en el cartografiado TCS-CAIN de mayor sensibilidad y resolución espacial, permitió detallar la estructura a gran escala de las regiones más profundas y extintas de nuestra galaxia.

(Más información sobre instrumentación infrarroja en siguientes páginas)

FRANCISCO GARZÓN LÓPEZ,  
astrofísico del IAC, catedrático de la ULL  
e Investigador principal de EMIR, PHT-S y CAIN-II



# El infrarrojo

## Las otras caras del Universo

Los estudios astrofísicos en infrarrojo no eran demasiado conocidos en el ámbito de la divulgación científica hasta que, en 2022, gracias al telescopio espacial James Webb (JWST), empezaron a estar muy presentes en todos los medios de comunicación. Por ello, quizá sea el momento de hacer un breve resumen de su historia e importancia para la astronomía.

Para comenzar, podemos decir que durante siglos los astrónomos nos hemos afanado por estudiar aquellos objetos celestes que podíamos ver a simple vista o a través del ocular de un telescopio; primero, con telescopios rudimentarios y, posteriormente, con el desarrollo de otros cada vez más potentes. Viajamos más lejos en el Universo, desde nuestra luna hasta más allá del Sistema Solar, pero inicialmente nos limitábamos a lo que podíamos ver con nuestros ojos; sólo existía la luz en el rango visible que nos llegaba de las estrellas, las nebulosas, los planetas y las galaxias, y por supuesto, lo que estaba oculto tras las nubes estelares, invisible quedaba para nosotros, como parches negros o muros entre las estrellas y que nos impedían ver más allá.

Sin embargo, la curiosidad humana no tiene límites, y fue William Herschel hace más de 200 años, quién descubrió una novedosa radiación mientras realizaba sus experimentos con haces de luz solar. Herschel ya había estudiado la variabilidad de las estrellas y le preocupaba que nuestro sol pudiera variar de forma similar, por lo que comenzó a experimentar con su luz: para ello necesitaba disponer un filtro para su telescopio con el que poder observar el Sol sin peligro y se había dado cuenta de que no todos los colores dejaban pasar la misma cantidad de luz y calor. Por ejemplo, el verde no se calentaba, pero dejaba pasar demasiada luz, mientras que los filtros más rojos aumentaban su temperatura demasiado al ser expuestos al Sol.

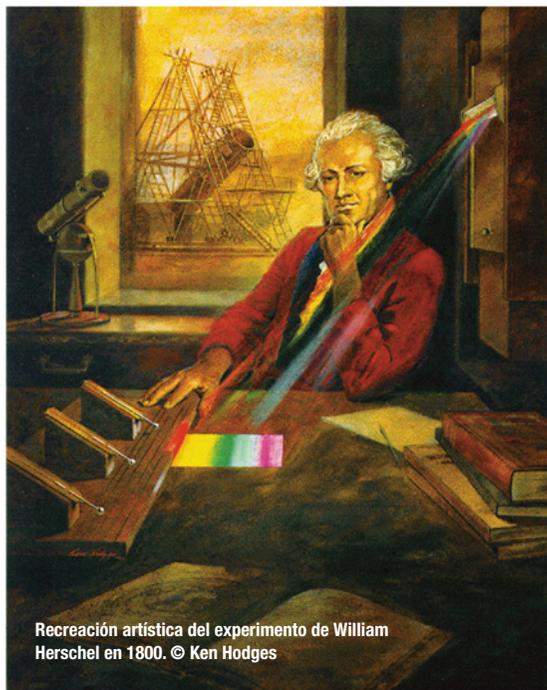
El experimento consistía en hacer pasar la luz del Sol por un prisma que la descomponía en los colores del arcoíris o luz visible. Herschel colocó varios termómetros para medir la temperatura de cada uno de los colores del espectro por separado y otro termómetro fuera del haz de luz para controlar la temperatura de la habitación. La sorpresa fue grande cuando comprobó que, más allá del rojo, donde ya no había aparentemente ningún color, la

temperatura de los termómetros seguía aumentando por algún tipo de radiación que emitía el Sol, pero que el ojo humano no conseguía ver. Herschel la describió como rayos caloríficos, pero realmente acababa de descubrir lo que posteriormente se llamó "infrarrojo", o "por debajo del rojo".

Pero ¿era esta la única radiación que no podíamos ver? Este nuevo descubrimiento despertó el interés del resto de la comunidad científica de la época por otras posibles radiaciones desconocidas más allá del visible. Johann Ritter, en 1801 se comenzó a plantear que, si había radiación más allá del rojo, también podría existir otra más allá del azul. De esta manera el descubrimiento del infrarrojo sirvió de punto de partida para que conociéramos la existencia de la radiación ultravioleta, los rayos X y gamma hacia la zona de altas frecuencias, y las microondas y ondas de radio más allá del infrarrojo. Se nos descubría poco a poco todo el espectro electromagnético de la luz.

A raíz de los nuevos descubrimientos fueron también los avances tecnológicos para estudiar el infrarrojo. En 1856, Charles Piazzí Smyth, desde la montaña de Guajara en Tenerife, detectó por primera vez la emisión infrarroja proveniente de la Luna llena y la evidencia de que nuestra atmósfera absorbía gran parte de esta radiación; cuanto más alto subía a la montaña, más intensa parecía ser la detección. Se midió también en estrellas muy cercanas y planetas del Sistema Solar a lo largo del siglo XIX y principios del siglo XX usando primero termopares, detectores muy básicos que aprovechan la diferencia de temperatura de dos metales para producir una corriente eléctrica, y posteriormente, bolómetros más sofisticados. Pero no fue hasta la década de los 50-60 del siglo XX cuando realmente se avanzó en este campo aprovechando los grandes avances tecnológicos después de la Segunda Guerra Mundial y el desarrollo de detectores basados en semiconductores.

Ahora se sabe bien que el infrarrojo es una radiación térmica, es decir, una radiación que producen los cuerpos por el mero hecho de tener una temperatura mayor que el cero absoluto,  $-273^{\circ}\text{C}$  o 0 grados Kelvin. Tiene mayor longitud de onda que el visible y se puede subdividir en varias regiones: infrarrojo cercano (NIR) de 0,8 a 2,5 micras; infrarrojo medio (MIR) de 2,5 a 50 micras; infrarrojo lejano (FIR) de 50 a 500 micras. Esta subdivisión se basa principalmente en la percepción humana de cada uno de estos rangos. El NIR sería la región más cercana a la detectable por el ojo humano, y el MIR y el FIR estarían progresivamente más lejos. Por supuesto, para detectar cada una de estas subdivisiones debemos usar materiales distintos, ya que no reaccionan igual con todos los materiales: silicio, indio, galio y arsénico, para radiación muy cercana a la visible; detectores de mercurio, cadmio y telurio, para el NIR y el MIR; y de indio, germanio y galio, para el FIR. Dichos detectores deben, además, estar enfriados a temperaturas extremadamente bajas dentro de unos recipientes llamados criostatos, una especie de termos adaptados para evitar que cualquier cuerpo con cierta temperatura que esté en los alrededores pueda contaminar la señal que nos viene del Cosmos, incluso del propio telescopio. Generalmente, se usa nitrógeno líquido ( $-200^{\circ}\text{C}$ ) y helio ( $-270^{\circ}\text{C}$ ) para alcanzar esas temperaturas tan bajas.



Recreación artística del experimento de William Herschel en 1800. © Ken Hodges

No obstante y a pesar de todos estos avances, lo que nos llega a la Tierra es una ínfima parte de esta radiación, como ya predijo Piazzi Smyth. Nuestra querida atmósfera, que permite la vida en la Tierra, también es la enemiga de los astrónomos e impide que nos llegue la mayoría de los rayos infrarrojos. Sólo unas pequeñas “ventanas atmosféricas” en el infrarrojo cercano y medio hacen que podamos obtener información desde los telescopios en Tierra. La absorción del dióxido de carbono y el vapor de agua de la atmósfera y su propia emisión a estas longitudes de onda dificultan mucho el estudio de los cuerpos celestes en este rango del espectro. Por ese motivo, en las últimas décadas, los científicos hemos optado por buscar los sitios ideales para la observación astronómica en infrarrojo. Deben ser sitios muy altos, con la menor cantidad de atmósfera posible, con bajo vapor de agua para no estar contaminados por su emisión y cuya turbulencia sea además muy baja para tener mejor nitidez en los datos. Sitios como Chile o Hawái, en los que hay instrumentación infrarroja en sus instalaciones y, cómo no, en los Observatorios de Canarias -el del Teide, en Tenerife, y el del Roque de los Muchachos, en La Palma-, que gozan de una envidiable calidad del cielo y tienen, en la actualidad, el mayor telescopio con tecnología de este tipo: el Gran Telescopio Canarias (GTC), de 10,4 m.

Pero estos instrumentos y telescopios terrestres ubicados en lugares inmejorables sólo nos permiten observar la radiación que finalmente alcanza a la Tierra: varias ventanas en el NIR, muy poco en el MIR y absolutamente nada en el FIR. Tenemos entonces que subir más arriba, sorteando la atmósfera y llegar al espacio usando experimentos primero a bordo de aviones y globos estratosféricos como SOFIA (Boeing 747SP); y finalmente con satélites, IRAS (12-100 micras), ISO (2,5- 240 micras), Spitzer (3,6–160 micras), Herschel Space Observatory (55-672 micras) y, por último, el recién estrenado James Webb (0,6–28 micras).

Con todos estos avances tecnológicos: telescopios en Tierra y en el espacio y con la premisa de “hasta el infinito y más allá”, los astrónomos teníamos aquí una nueva pieza para entender el Universo. De igual manera que con una sola pieza en un *puzzle* no puedes identificar todo un paisaje con precisión, tampoco con sólo la información en una longitud de onda podemos tener una idea exacta de qué está ocurriendo allá arriba para comprender realmente cómo funciona el Universo. Inicialmente se pensaba que solo se detectarían objetos en el infrarrojo que ya tenían contrapartida en el visible. Sin embargo, esto no fue así y, al mirar en lugares oscuros y polvorientos de los que la luz no puede escapar, el infrarrojo demostró que era esencial

para el estudio de las estrellas en formación y recién nacidas que de otro modo habrían estado ocultas a la vista para siempre.

Pero ¿qué es todo eso tan interesante que queremos estudiar los astrofísicos que trabajamos a estas longitudes de onda? Pues realmente de todo, desde la emisión de los planetas del Sistema Solar, estrellas cercanas dentro de la Vía Láctea, estrellas en otras galaxias, búsqueda de planetas en sistemas solares remotos, galaxias recién nacidas cuando el Universo era aún muy joven y se estaba comenzando a formar todo lo que hoy conocemos, etc. Podemos decir que el infrarrojo nos permite conocer otras caras del Universo.

### EL UNIVERSO OCULTO

Con las observaciones infrarrojas podemos atravesar el velo de nubes de gas y polvo que existe en nuestra galaxia y llegar al corazón de la mismísima Vía Láctea. La concentración de partículas de polvo en esas regiones es muy alta y nos impide ver las estrellas que están ahí detrás, millones de estrellas que están inmersas en la oscuridad para los telescopios ópticos. Allí donde solamente veíamos nubes oscuras, el infrarrojo cercano nos descubre millones de estrellas nuevas. Estrellas cuya radiación es absorbida por los granos de polvo que se calientan y reemiten en esa longitud de onda para que pueda continuar su camino



A la izquierda, región de la Vía Láctea del proyecto PanSTARRS capturada del *Aladin Sky Atlas* desarrollado por CDS, Strasbourg Observatory, Francia. A la derecha, la misma zona con EMIR (bandas J, H y K) en el Gran Telescopio Canarias. Donde veíamos unos cientos de estrellas en el visible, detectamos miles en el NIR y no siempre igual de brillantes. Podríamos pensar que fueran dos regiones completamente distintas del Cosmos.

hasta la Tierra. De la misma manera, se demostró que las galaxias activas con un agujero negro en su centro son extremadamente brillantes en longitudes de onda infrarrojas, o que galaxias que parecen inactivas en el visible, sin embargo, son ultra luminosas en el infrarrojo al tener estallidos de formación de nuevas estrellas. Nubes en las que están naciendo estrellas, estrellas T-Tauri y sistemas planetarios, rodeados de material residual de su formación o incluso galaxias enteras ocultas y, por supuesto, el agujero negro supermasivo que existe en el centro de la Vía Láctea (Sagitario A).

Mirando el Universo con el infrarrojo por primera vez, se nos antoja estar mirando algo completamente nuevo y en ocasiones muy distinto a lo que conocíamos.

### EL UNIVERSO POLVORIENTO

Si usando el infrarrojo cercano aparecen estrellas ocultas por el polvo, en el infrarrojo medio ese polvo se calienta y vuelve a emitir brillando como nunca, permitiéndonos hacer un estudio más exhaustivo de esas masas que forman los nidos de nacimiento de estrellas y planetas. Por ejemplo, con el satélite Herschel en el infrarrojo medio y lejano se han descubierto cientos de miles de fuentes compactas que en realidad son “guarderías” con estrellas recién nacidas y que no se conocían hasta entonces.





Arriba, nebulosa del Águila en el infrarrojo lejano con el observatorio espacial Herschel y, abajo, otra región de la Vía Láctea (burbuja RCW 120 a unos 4.300 años luz) en la que se están formando estrellas nuevas continuamente. Se aprecia además la forma de la burbuja producida por la presión de la radiación de las estrellas en el medio interestelar. © ESA/Herschel/PACS/SPIRE/Hill, Motte, HOBYS Key Programme © ESA/PSA/Herschel/PACS, SPIRE/Hi-GAL Project/G. Li Causi, IAPS/INAF, Italia

### EL UNIVERSO FRÍO

Cualquier objeto que exista emite en el infrarrojo, incluso los que tienen temperaturas extremadamente bajas del orden de 3K (-270°C). La mayor parte de la emisión de estos cuerpos se produce en el infrarrojo y serán indetectables en el visible. Desde pequeñas partículas

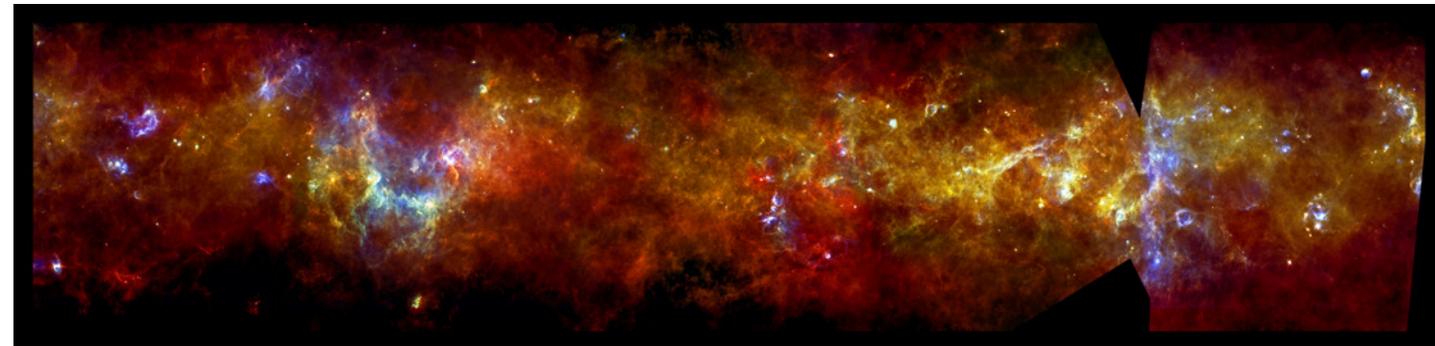
de polvo hasta superficies heladas de planetas, la atmósfera de estrellas y planetas y el gas interestelar que los rodea. Usando el infrarrojo cercano y medio se puede estudiar algo tan sorprendente como es la atmósfera de los planetas fuera de nuestro sistema solar, los exoplanetas y, de esta manera, detectar la presencia de elementos clave para considerarlo habitable o no. Cuando un planeta pasa por delante de su estrella, la luz de la estrella atraviesa la atmósfera del planeta y si, por ejemplo, contiene sodio (Na) en su atmósfera, el espectro de la estrella, sumado al del planeta, tendrá lo que llamamos una "línea de absorción" en el lugar del espectro donde se esperaría ver sodio. Esto se debe a que los diferentes elementos y moléculas absorben luz a energías características. Este efecto lo podemos extrapolar a otros compuestos químicos que pudieran estar presentes en ese planeta, el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) o el oxígeno (O<sub>2</sub>).

### EL UNIVERSO MOLECULAR

Las nubes frías de gas molecular emiten en el infrarrojo lejano en un rango de 60-100 micras. El hidrógeno atómico, en las llamadas líneas de Brackett y Paschen, el hierro neutro e ionizado, oxígeno, azufre, nitrógeno, neón, líneas prohibidas de oxígeno (OIII) y nitrógeno (NIII) y una gran variedad de elementos emiten en el infrarrojo medio y lejano para darnos una idea exacta de la composición del Universo. Una visión más precisa de cómo la evolución de las estrellas y su muerte a través de explosiones de supernova ha ido enriqueciendo el medio interestelar a su alrededor, desde el hidrógeno inicial hasta los elementos pesados que constituyen toda la materia y que se sintetizaron en el interior de las estrellas. Sí, en definitiva somos simple, o no tan simple, polvo de estrellas.

### EL UNIVERSO RECIÉN NACIDO

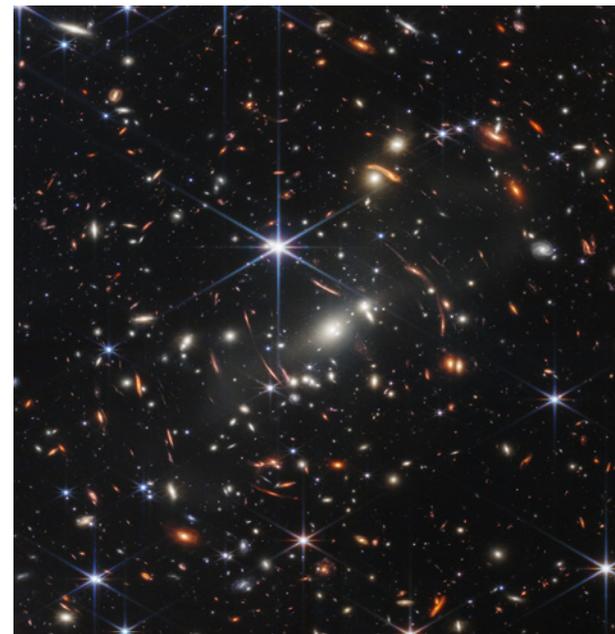
Debido a la expansión del Universo, muchas líneas espectrales de las galaxias lejanas están desplazadas a longitudes de onda mayores, lo que se conoce como desplazamiento al rojo o *redshift* (*z*). Muchas de las líneas espectrales que estudiamos los astrofísicos para saber la composición o estado evolutivo de las galaxias primigenias están desplazadas abandonando el rango óptico y entrando en la región del infrarrojo cercano y medio. Y es gracias al infrarrojo que podemos estudiar con más detalle la composición y distribución espacial del Universo cuando comenzaron a formarse las galaxias hace más de 13.000 millones de años. ¿Estaban aisladas o formando cúmulos? ¿Se parecen a la Vía Láctea o la



Estructura filamentosa del gas y polvo del plano de la Vía Láctea obtenida con el satélite Herschel. © ESA/PACS & SPIRE Consortium, S. Molinari, Hi-GAL Project

evolución ha sido tan grande que no tienen que ver con el Universo Local?

Una época interesante del Universo para intentar responder a estas preguntas es la época de reionización, cuando la materia volvió a ser plasma ionizado y comenzó a condensarse para formar estructuras -entre 150 millones de años y 1.000 millones de años después del Big Bang- que darían lugar a las primeras estrellas y galaxias.



Primera imagen profunda del Universo tomada por el telescopio espacial infrarrojo James Webb de la NASA. © NASA, ESA, CSA y STSCI.

Pero ha sido en el año 2022 cuando, gracias al lanzamiento y comienzo de operaciones del James Webb Telescope (JWST), se han alcanzado límites nunca vistos. Libre de la atmósfera terrestre, situado más allá de la Luna en el punto L2 de Lagrange, y provisto de la última tecnología, 12 años más avanzada que la del observatorio espacial Herschel, nos ha desvelado con más nitidez lo que hay dentro de las nebulosas. Pero, sobre todo, nos está revelando un Universo primigenio que no nos esperábamos del todo. En las últimas décadas se ha barajado el número de galaxias que podríamos encontrar en esa época inicial, pero gracias a los datos recibidos a lo largo de la segunda mitad de 2022, este número de galaxias se ha incrementado de forma sorprendente. Empieza ahora un nuevo reto para la astronomía internacional y un momento tal vez para replantearse algunos modelos cosmológicos y seguir avanzando.

De la mano de los avances tecnológicos y los esfuerzos de los científicos en los últimos 200 años, se han dado pasos de gigante para el conocimiento del Cosmos, ese universo que se oculta de nuestros ojos y que sólo el infrarrojo puede desvelar.

NIEVES CASTRO,  
astrónoma de soporte del GTC

(Artículo publicado en la revista *Astronomía* con el título "El Infrarrojo: estudiando el Universo oculto", n. 283, enero 2023).

# Galaxias en el infrarrojo

¿Por qué el infrarrojo? ¿Qué nos aporta?... La respuesta más inmediata es que se trata de estudiar todo el espectro electromagnético de los diferentes objetos del Universo. Es claro que esto nos da mucha más información que si nos restringiéramos a un solo rango espectral. El infrarrojo (IR) es uno de estos rangos, antes poco explorados, que ahora se considera de vital importancia.

La astronomía explota todo el espectro electromagnético para entender los planetas, las estrellas o las galaxias. Nuestro universo está lleno de objetos que emiten luz de muy distintas longitudes de onda, desde muy cortas, como los rayos gamma o los rayos X, hasta muy largas,

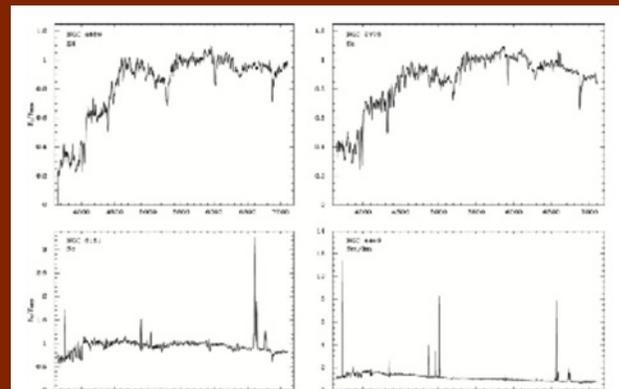


Galaxia espiral de los Fuegos Artificiales (NGC 6946), vista frontalmente y obtenida con el instrumento OSIRIS en el GTC. La parte central es el bulbo de la galaxia, donde se encuentran muchas de las estrellas más viejas. Los brazos espirales más azules están trazados por estrellas más jóvenes y gas. El gas, hidrógeno en su mayoría, excitado por los fotones de las estrellas calientes y azules, emite en el visible líneas de recombinación del hidrógeno. © Equipo GTC/Daniel López

como las de radio. El rango óptico, la región del espectro de la luz visible, nos permitió clasificar objetos, identificar galaxias, separarlas de las nebulosas (como hizo Messier en su catálogo que aún ahora se usa) y aislarlas, como los “universos islas”, a las que se referían Kant y Hubble. Sus imágenes, su apariencia con la luz visible, nos llevó a ponerles nombre, elípticas o espirales o irregulares, y a saber que muchas están solas, pero que otras tenían compañeras. Algunas estaban en grupos, que a su vez formaban comunidades mayores, los cúmulos de galaxias. Todo nuestro universo cercano fue así tasado y medido con nuestros ojos, que solo ven en el rango óptico.

Ya desde Galileo, el telescopio buscó la luz visible, recoger cada vez un mayor número de fotones en ese rango del espectro, y así se diseñaron sus superficies ópticas y, más adelante, las placas fotográficas que, a su vez, a partir de los años 80, evolucionaron hasta los detectores electrónicos.

Estudiamos la luz visible de modo extensivo, separándola en las distintas regiones que nos dan los espectros. Las galaxias se estudiaron no sólo por sus formas, sino también por los rasgos, las líneas de absorción y emisión que mostraban en su espectro.



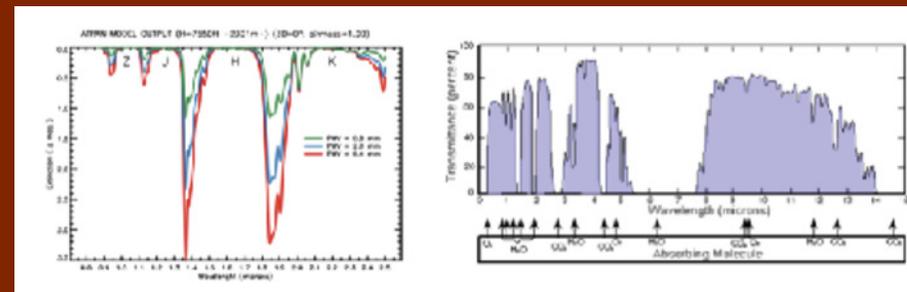
Los cuatro espectros de la figura corresponden a cuatro tipos de galaxias. El del panel superior izquierdo es de una galaxia elíptica. La luz emitida en todas las longitudes de onda construye el continuo que viene de todas las estrellas rojas y viejas de la galaxia. Los picos hacia abajo son las líneas que se producen cuando la luz es absorbida por diferentes átomos que están en las atmósferas estelares. Estos patrones nos permiten calcular cuántas estrellas y de qué tipo forman la galaxia. En el panel superior derecho, el espectro es de una galaxia espiral temprana, que en muchos aspectos se parece a una elíptica. Tiene un continuo estelar importante, y líneas de absorción. Los dos paneles inferiores son bien diferentes. El continuo estelar se hace menos importante, casi desaparece en el caso de la galaxia irregular que se muestra: NGC 4449. Y empiezan a dominar las líneas de emisión producidas por el gas, muy abundante, excitado por los fotones de estrellas cada vez más jóvenes y masivas.



Composición de imágenes con tres telescopios de M82 o galaxia del Cigarro, el ejemplo paradigmático de una galaxia aparentemente tranquila. Lo que nos mostraba su aspecto en luz visible con el HST como una forma alargada parecida a un puro, en la imagen en tonos grises-verdosos. La emisión de hidrógeno aparece en naranja, y la luz visible más azul, en amarillo verdoso. Los ojos abiertos a otras longitudes de onda desvelaron la increíble actividad que despliega. La luz azul es el gas muy caliente que está escapando de la galaxia, visto con el telescopio Chandra en rayos X. En rojo se ve la luz en el rango infrarrojo fotografiada con el telescopio Spitzer. © NASA/JPL-Caltech/STScI/CXC/UofA/ESA/AURA/JHU

Con las imágenes y su medida, la fotometría, y la espectroscopia, se han desarrollado modelos que reproducen muy bien lo que se observa. Modelos que nos dan la masa en estrellas, la cantidad de gas o la historia de la galaxia a partir de la medida del ritmo a que se forman las estrellas.

Con el tiempo, nuestros ojos “ampliaron” sus miras, los satélites nos abrieron la puerta de las longitudes de onda cortas, las que la atmósfera filtra para permitirnos vivir en la Tierra. Los rayos gamma, los rayos X, el ultravioleta... nos enseñan los fenómenos más energéticos del Universo, colapsos de estrellas, el gas que se traga un agujero negro, la explosión de las supernovas, la fusión



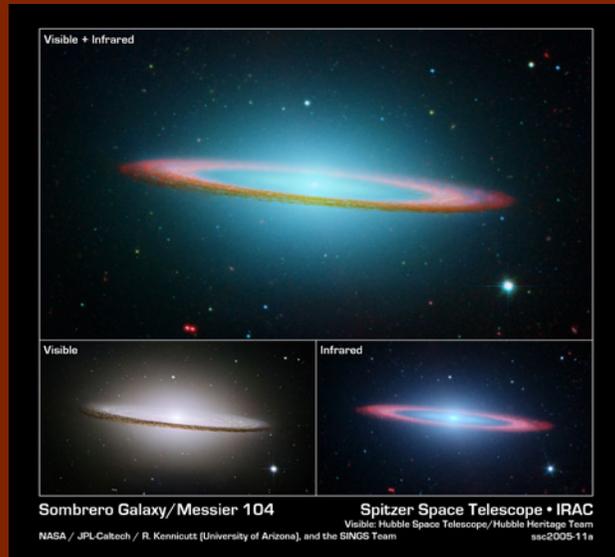
de las galaxias... Los telescopios actuales son diseñados para recoger fotones de cualquier rango del espectro electromagnético. Entre ellos, el infrarrojo ha cobrado especial interés en los últimos 30 años. La fabricación de nuevos detectores sensibles a la luz infrarroja ha posibilitado observaciones cruciales. Por ejemplo, el telescopio espacial James Webb (JWST) -la nueva versión del exitoso HST (Hubble Space Telescope)- está optimizado para la observación en el amplio rango del espectro IR. El infrarrojo cercano incluye las bandas que en fotometría se conocen como J, H y K, así como el IR lejano, que se extiende hasta longitudes de onda cercanas a las ondas milimétricas, que ya se miden con radiotelescopios.

El rango infrarrojo se caracteriza por ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda que las del rango visible. La longitud de onda de la radiación incide directamente en su capacidad de penetrar la materia y no ser absorbida por ella. La luz IR nos revela el interior de las nebulosas y de las galaxias. Las estrellas se forman en nubes densas de gas y polvo y, a su vez, cuando evolucionan lanzan sus capas externas al medio circundante y lo contaminan con más polvo enriquecido con los elementos químicos que conocemos de la tabla periódica, como litio, oxígeno o carbono. Las nubes de gas y polvo bloquean la luz en el rango visible mientras que la radiación IR puede penetrarlas y mostrarnos todo lo que antes estaba oscurecido y oculto.

Además, el IR nos lleva a estudiar fenómenos diferentes a los observados en el rango visible. Mientras en este rango vemos transiciones atómicas principalmente, en el infrarrojo veremos transiciones moleculares. Si, además, nos vamos suficientemente al rojo, detectaremos también la presencia de granos de polvo cósmico.

Otra razón central para movernos a longitudes de onda más rojas: las del IR se basan en la expansión del Universo y, por tanto, en el desplazamiento al rojo de la

Las moléculas de la atmósfera absorben la radiación IR. El vapor de agua es el componente principal en esta absorción y se mide con el parámetro PWV (*Precipitable Water Vapour*) que da la altura en milímetros que alcanzaría el agua de la atmósfera si se condensara. Afortunadamente, hay ventanas -rango en longitud de onda- libres que aprovechamos en astronomía. Además, observando desde tierra se buscan lugares con valores bajos de vapor de agua (PWV), como son los observatorios de Hawái, Chile o Canarias. En el IR cercano, las “ventanas” de observación están en las bandas J, H y K a (1,1-1,4), (1,5-1,8) y (2,0-4,0) micras. En el IR medio son las bandas L, M y N a (3,0-4,0), (4,6-5,0) y (7,5-14,5) micras (se ven en la figura derecha del panel superior).



Galaxia del Sombrero (Messier 104). El panel inferior izquierdo es como se ve la galaxia en el rango visible. La imagen inferior de la derecha es Messier 104 vista con Spitzer, un telescopio espacial con ojos en longitudes de onda infrarrojas.

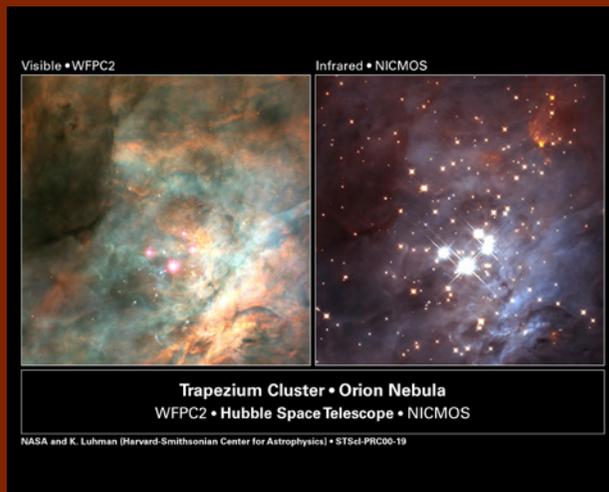
luz de los objetos. El rango infrarrojo nos abre nuevas ventanas temporales, nos permite ver con nuestros “ojos sesgados” galaxias en épocas muy anteriores a la actual y es particularmente importante para observar el universo temprano, cuando se formaron las primeras galaxias.

Así que ya tenemos al menos tres grandes razones para investigar en el rango infrarrojo, las transiciones moleculares, el polvo cósmico y los objetos de alto desplazamiento al rojo. Las primeras nos llevan a zonas no muy calientes del Universo. En los lugares calientes, las moléculas se rompen (disocian). Por eso, el infrarrojo es ideal para estudiar las zonas de formación estelar, tanto de nuestra galaxia como de galaxias lejanas. Las estrellas se forman en nubes moleculares relativamente frías y llenas de polvo, que colapsan gravitatoriamente formando nuevas estrellas. El estudio de estas zonas de formación estelar es, por tanto, un campo fértil para el infrarrojo. En efecto, si en rango óptico solo deja ver las estrellas más brillantes, el infrarrojo permite ver el gas y el polvo que se están empleando para formar nuevas estrellas.

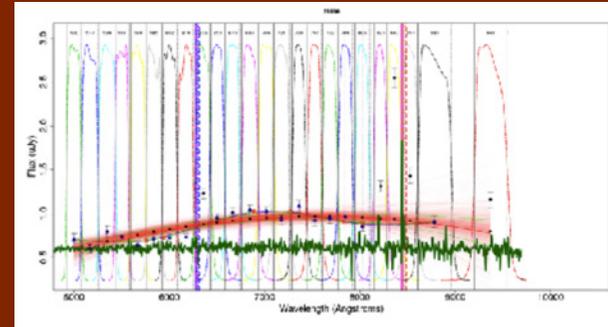
La tecnología infrarroja se ha desarrollado muy rápidamente. En los años 80 se hicieron los primeros detectores monodimensionales, con más de un pixel. Hoy en día existen detectores panorámicos infrarrojos con millones de píxeles. Esto permite hacer imágenes

infrarrojas como en los años 80 se hacían imágenes en el rango visible. Por supuesto, los instrumentos infrarrojos se han desarrollado enormemente en estos últimos años. Un ejemplo claro es EMIR, el instrumento infrarrojo del GTC, que no solo obtiene imágenes infrarrojas, sino también espectroscopía infrarroja. Además, con su nuevo detector, y esto es el gran avance de EMIR, permite hacer espectroscopía de hasta 40 fuentes infrarrojas simultáneamente, con su capacidad multiobjeto.

Los grandes telescopios, el telescopio espacial Hubble (HST) y los satélites infrarrojos (ISO, Spitzer, Herschel) han permitido el estudio de objetos de muy alto desplazamiento al rojo. Es decir, objetos muy lejanos, de cuando el Universo era muy joven y tenía apenas 500 millones de años (ahora tiene 13.800 millones de años). En este caso, el infrarrojo permite analizar las observaciones de objetos muy lejanos con las técnicas aprendidas a lo largo de los años del espectro visible. Solo que las líneas espectrales, que se analizaban antes mediante observaciones en el rango visible, se observan ahora en el rango infrarrojo. Así, por ejemplo, la línea del hidrógeno Lyman alfa, que en el laboratorio aparece a 1.215 Å, puede verse en el rango infrarrojo en objetos que se observan de cuando el Universo tenía solo unos 500 millones de años. Hoy en día, observar en el rango infrarrojo es tan normal como era observar en el rango



Estas dos imágenes son de la nebulosa de Orión, en la constelación que lleva su nombre. La de la izquierda es una imagen en el rango óptico. La de la derecha es Orión en el infrarrojo. Nótese la cantidad de estrellas que en el rango óptico no pueden verse debido al polvo que hay en esta nebulosa. Esto no es especial. La mayoría de las regiones del cielo donde se están formando estrellas hay también una gran cantidad de polvo que las oculta.



La imagen ilustra cómo las galaxias que no están en el universo próximo emiten a una longitud de onda ( $\lambda$ ) desplazada hacia el rojo. En verde se ve el espectro de una galaxia joven con mucha formación estelar (poco continuo y líneas de emisión). La línea más intensa corresponde a la longitud de onda de la emisión del hidrógeno ionizado. La conocemos como línea H $\alpha$  y tiene una longitud de onda en reposo de 6.563 Å. La galaxia está medida con el telescopio GTC en el cartografiado SHARDS. Se han tomado imágenes en filtros estrechos que van desde el UV cercano hasta el IR próximo. Los filtros usados se ven en la imagen. Los puntos nos dicen cuánto emite la galaxia en cada filtro y vemos que en el filtro centrado en 8.000Å muestra el máximo de emisión. El espectro se ha corrido hacia el rojo. De ahí sabemos que la galaxia está a un desplazamiento al rojo de 0,69. Es una galaxia muy débil, pequeña y activa, como las que debieron formar el universo más primitivo, y que podemos cazar si buscamos sus líneas de emisión dominantes en longitudes de onda dentro del rango IR. Esto hace el instrumento EMIR, que puede ver hasta longitudes de onda tan largas como 2,5 micras, equivalente a 25.000Å, que permiten por ejemplo ver galaxias con patrones parecidos al que mostramos en la figura, es decir galaxias con formación estelar de cuando el Universo tenía apenas unos pocos cientos de millones de años.



El centro de nuestra galaxia, visto en el infrarrojo usando el Keck Laser Guide Star. La cruz blanca marca la localización del agujero negro supermasivo. © W. M. KECK Observatory/ UCLA Galactic Center Group

visible hace 50 años. El infrarrojo, sin embargo, llega allí donde la luz visible no puede llegar. Dos ejemplos ilustrativos, el centro de nuestra galaxia y el universo temprano. El centro de nuestra galaxia es totalmente opaco para las observaciones visibles, debido a la gran cantidad de polvo que hay en la línea de visión hacia el centro galáctico. En el infrarrojo no es problema, lo que permite observar muchas de las estrellas que hay cerca del centro de nuestra galaxia y, por ejemplo, determinar la masa del agujero negro que alberga y del que recientemente se han hecho imágenes con interferometría en radio.

Por último, los estudios del Universo temprano se hacen principalmente mediante la observación de la línea más brillante del hidrógeno, la línea Lyman-alfa. Esta línea, que en el laboratorio está en el rango ultravioleta (1.215 Å) debido a la expansión del Universo, se desplaza hasta el rango infrarrojo a partir de un desplazamiento al rojo de  $z \sim 9$  o 10. Por tanto, las observaciones del Universo temprano han de hacerse también en el rango infrarrojo.

El infrarrojo ha sido un rango de sinergia extraordinario entre diferentes disciplinas. Podemos observar en esta longitud de onda porque la tecnología lo ha permitido y la astronomía ha sido motor central de desarrollo tecnológico en este rango, esencial para el estudio del Universo.

CASIANA MUÑOZ TUÑÓN,  
subdirectora del IAC  
JOSÉ MIGUEL RODRÍGUEZ ESPINOSA,  
secretario general de la IAU

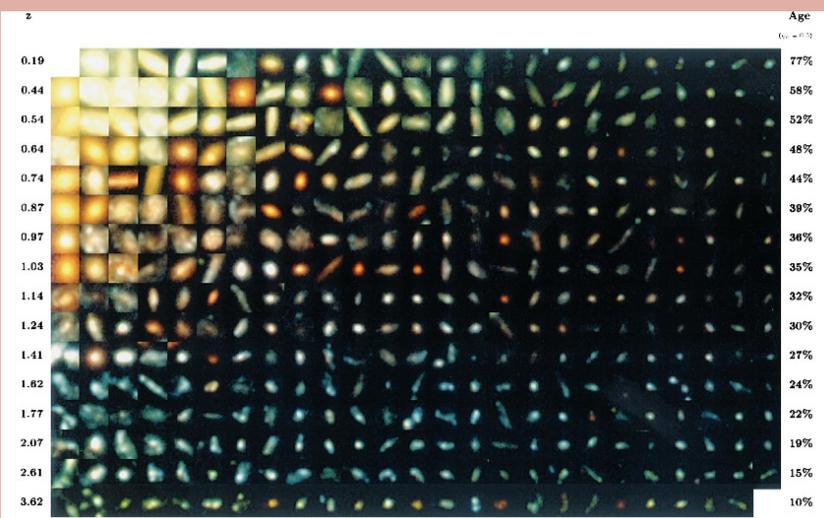


Impresión artística de CR7, una galaxia primigenia de cuando el Universo tenía unos pocos cientos de millones de años. Se parece mucho a algunas de las galaxias pequeñas cercanas, quizá fósiles del universo primitivo. Galaxia descubierta con el telescopio VLT, del ESO en Chile. © ESO/M. Kornmesser

# Formación tardía de galaxias tempranas

En los años 90, la formación y evolución de las galaxias era un misterio. La creencia general era que todas las galaxias se habían formado en edades muy tempranas del Universo y que después fueron evolucionando hasta sus formas actuales. Esto se basaba en el hecho observacional de que casi todas las galaxias cercanas observadas tenían estrellas muy viejas, como si se hubieran formado cuando el Universo era muy joven.

En 1995, con el Telescopio Espacial Hubble (HST) se realizó el primer mapeo, también llamado cartografiado, de un área del cielo para detectar galaxias lejanas. Este mapeo, denominado *Hubble Deep Field* (HDF), marcó un antes y un después en nuestro conocimiento sobre la formación y evolución de las galaxias. Aquí empieza realmente el estudio de las galaxias lejanas consideradas no individualmente, sino como poblaciones. Se desvelaron varias cosas interesantes, como se puede observar en la imagen de abajo. Por una parte, las galaxias rojas empezaron a aparecer mayoritariamente cuando el Universo tenía un 40% de la edad actual. ¿Aparecían como una simple evolución de las azules o habría otros mecanismos de formación? Por otra parte, y con gran sorpresa para todos, se puso de manifiesto que, en



edades tempranas del Universo, la mayoría de las galaxias tenían formas extrañas, eran irregulares y a veces en estrecha relación o fusionándose entre sí. ¿Cómo afectaría todo esto a la evolución de las poblaciones galácticas?

Por otra parte, cuando se contó el número de galaxias en un área determinada del HDF se encontró un defecto de galaxias tempranas o rojas (E-S0s) y un exceso de galaxias tardías o azules (S-Irrs), respecto a un modelo de evolución pasiva de las galaxias, donde éstas envejecen, pero no hay fusiones entre ellas (Driver, S. P. 1998). Tal desajuste nos está indicando la existencia de algún proceso no tenido en cuenta en el modelo, o galaxias que no son bien detectadas en el óptico, o ambas razones. Era urgente disponer de un mapeo profundo de galaxias en el infrarrojo (IR). Los cartografiados profundos de galaxias en esta banda nos darían claves para avanzar en nuestro conocimiento sobre la evolución de las galaxias.

A principios del siglo XXI, el equipo del proyecto GOYA (*Galaxy Origins and Young Assembly*), del que se habla en las siguientes páginas, disponíamos de los catálogos generados por un mapeo profundo de galaxias en el IR cercano y en las bandas U y B del óptico: el cartografiado fotométrico GOYA (GOYAPh) (Balcells et al. 2002). Nos aventuramos a estudiar el defecto de galaxias rojas en el HDF con los datos infrarrojos del GOYAPh. Resultó que las cuentas de galaxias en la banda K manifiestan un claro cambio de pendiente a 17,5 magnitudes (Figura 1), ya detectado por otros autores, pero aún de origen desconocido. Usamos el código de Gardner, J.P. (1998) para elaborar modelos de evolución galáctica, obtener predicciones de cuentas de galaxias en K y compararlas con las cuentas observadas. Los modelos consideran las galaxias tal como son en la actualidad y las hacen evolucionar hacia atrás en el tiempo según un conjunto de parámetros para cada tipo morfológico, entre otros muchos, la época de aparición de las galaxias.

La única forma que tuvimos de ajustar los modelos al cambio de pendiente fue retrasando la aparición de las galaxias elípticas a edades medias del Universo: no todas podían formarse al principio del mismo (Cristóbal-Hornillos et al. 2003).

Galaxias detectadas en el cartografiado HDF con el HST. Están ordenadas en luminosidad (dirección horizontal) y en edad (dirección vertical). (Driver, S.P. 1998)

Ahora tenemos indicios sobre el origen del cambio de pendiente en K. Este fue un resultado sorprendente en la época, que había que investigar con más datos y modelos.

## FUSIONES DE GALAXIAS

Para obtener más información, combinamos los datos ópticos e infrarrojos de los catálogos GOYAPh. Esto supuso fuertes restricciones a los modelos debido al cambio de pendiente en la banda K y a la ausencia del mismo en las bandas ópticas. Sólo modelos que incluyeran una formación tardía para las galaxias tempranas y una cierta tasa de fusiones (modelo EM06) reproducían bien las cuentas observadas en K (Figura 1) y en el óptico, simultáneamente. Una evidencia de que la mayoría de las galaxias tempranas masivas se formaron en épocas tardías del Universo. Además, se apuntaba a que el proceso de formación de las mismas debían ser fusiones entre galaxias (Eliche-Moral et al. 2006).

Durante los años siguientes, hubo numerosos estudios compatibles con los resultados anteriores. Faber, S.M. 2007, Ilbert, O. 2007, Arnouts, S. 2007, Cristóbal-Hornillos, D. 2009, Barro, G. 2009, entre otros muchos autores. No obstante, serán los modelos semianalíticos (SAM) de formación de galaxias los que confirmarán estos resultados y sugerencias. Un modelo SAM tiene la fortaleza de incluir no sólo funciones analíticas, sino también datos observados.

## MODELO SEMIANALÍTICO

María del Carmen Eliche del Moral confeccionó un modelo semianalítico de cuentas de galaxias muy preciso: el modelo EM10. Este modelo analiza la evolución de

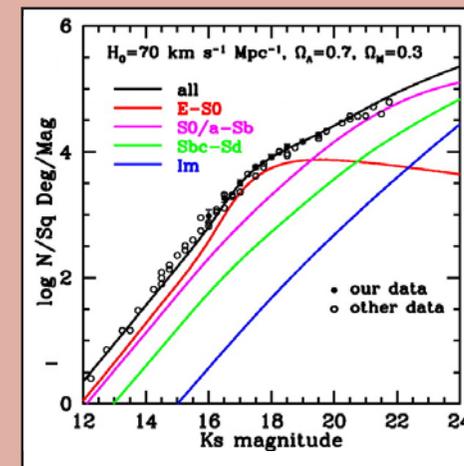


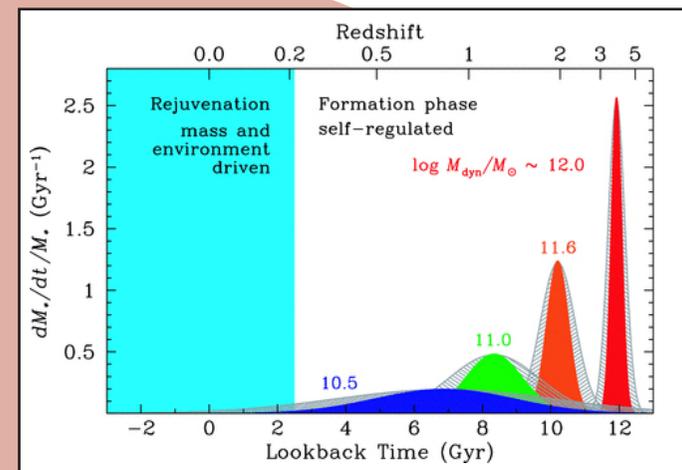
Figura 1 (a la izquierda). Representación del número de galaxias por grado cuadrado del cielo e intervalo de magnitud en el modelo EM06 según el tipo de galaxia (líneas), y las cuentas totales observadas (puntos y círculos). El modelo considera una formación tardía para las galaxias tempranas y una determinada tasa de fusiones entre galaxias.

Figura 2 (a la derecha). Esquema de la tasa de formación estelar por unidad de masa de la galaxia elíptica en función de la edad del Universo y en varios rangos de masas mostrando el escenario "downsizing" de formación de las galaxias (Thomas, D. 2010).

las galaxias hacia atrás en el tiempo desde la época actual bajo la hipótesis de que cada fusión mayor, esto es, entre galaxias masivas, conduce a una galaxia de tipo temprano. Considera sólo las fusiones mayores estrictamente registradas por las observaciones en cada edad del Universo (López-Sanjuan et al. 2009). Diferenciamos en el modelo entre varios tipos de galaxias rojas, las E-S0s y aquellas con formación estelar enrojecidas por polvo, es decir, fusiones en sus diferentes fases. Esto fue crucial para después comparar con las observaciones. Las fusiones son de naturaleza transitoria y acabarían siendo una galaxia E-S0. Las predicciones más destacadas del modelo fueron que es factible construir ~50-60% de la densidad numérica actual de las galaxias tempranas masivas a través de fusiones mayores entre diferentes tipos de galaxias y que la mayoría de este ensamblaje tuvo lugar en edades medias del Universo, hace entre ~9 y 6 mil millones de años. También se muestra que estos resultados son coherentes con el escenario de formación de galaxias llamado "downsizing" (Eliche-Moral et al. 2010).

## "DOWNSIZING"

Thomas, D. 2010 selecciona una muestra amplia observada de galaxias elípticas actuales y reproduce sus historias de formación estelar hacia atrás en el tiempo usando un modelo de evolución química. La Figura 2 muestra un esquema de cómo se van formando las galaxias elípticas en diferentes edades del Universo dependiendo de su masa. Las galaxias "muy masivas" se formaron cuando el Universo era muy joven, con tasas muy altas de formación estelar y en un período muy corto de tiempo. Las galaxias masivas y menos masivas se



van formando después en edades mayores del Universo, con tasas de formación estelar más bajas y durante periodos de tiempo más largos, hasta llegar a las galaxias de “baja masa”. A este escenario de formación de galaxias se le llama “downsizing”, también expuesto con más información en De La Rosa, I.G., 2011.

El rango de masa de las galaxias en el modelo EM10 ( $\sim 10^{11}$  masas solares) se corresponde con el de la gaussiana verde en la Figura 2, y en ambos casos las galaxias se forman mayoritariamente en edades medias del Universo. Galaxias de baja masa pueden haberse formado en épocas más recientes (Gallego, J. 2015, Rodríguez-Muñoz, L. 2015), y las muy masivas, en épocas más remotas (Pérez-González, P.G. 2008). Podemos decir, por tanto, que el modelo EM10 es coherente con el escenario “downsizing” de formación de galaxias. No obstante, son necesarias evidencias observacionales para apoyar sus predicciones.

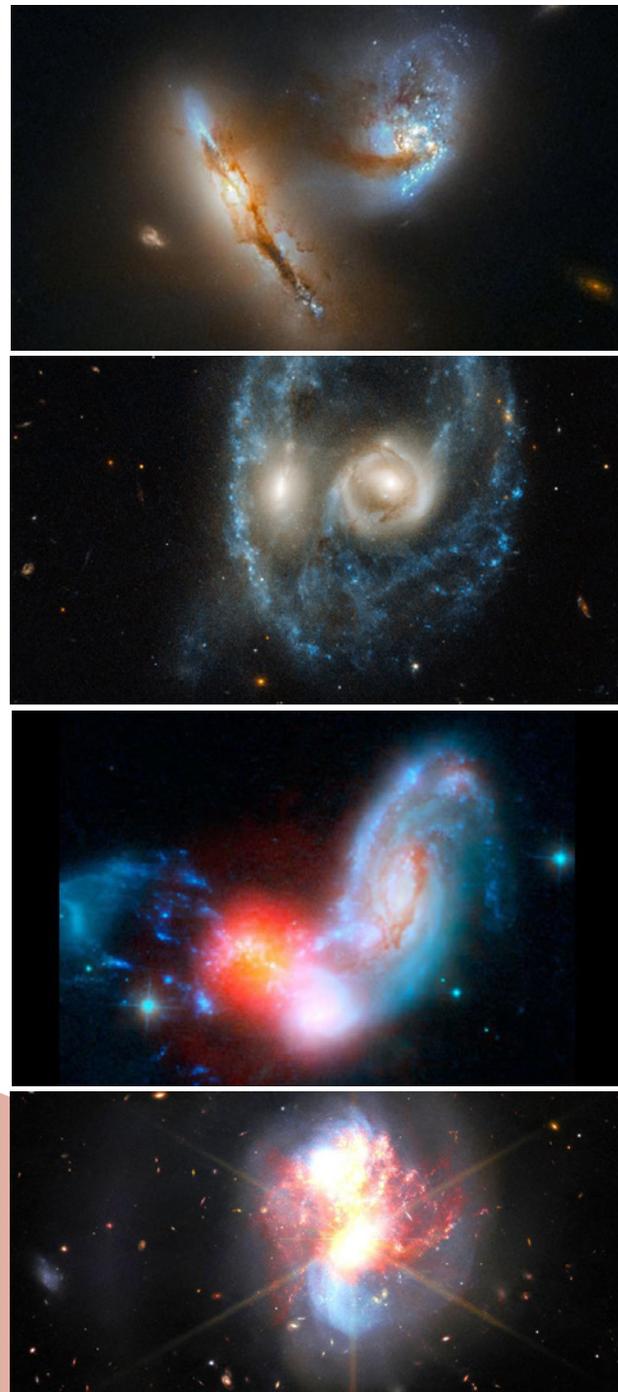
### OBSERVACIONES

Para comparar las predicciones del modelo EM10 con observaciones, usamos imágenes en las bandas ópticas e infrarrojas del mapeo GOYAPh (WHT y INT), V e I del HDF (HST) y emisiones de las galaxias en la banda de 24 micras del IR lejano obtenidas con el telescopio espacial Spitzer. Clasificamos las galaxias rojas del mapeo GOYAPh según su morfología global, distorsión estructural y ritmo de formación estelar permitiendo así diferenciar distintas fases del proceso de fusión (imagen a la derecha), así como su producto final, una galaxia elíptica. El resultado principal fue que, desde hace  $\sim 9$  hasta 6 mil millones de años, el número de fusiones mayores que va teniendo lugar en función del tiempo coincide con el número de galaxias E-S0s masivas que van apareciendo. Estos datos prueban que cada proceso de fusión mayor entre galaxias termina en una galaxia masiva E-S0, lo que demuestra la hipótesis inicial del modelo EM10 y verifica también la predicción de que este proceso tiene lugar durante edades medias del Universo (Prieto, et al. 2013).

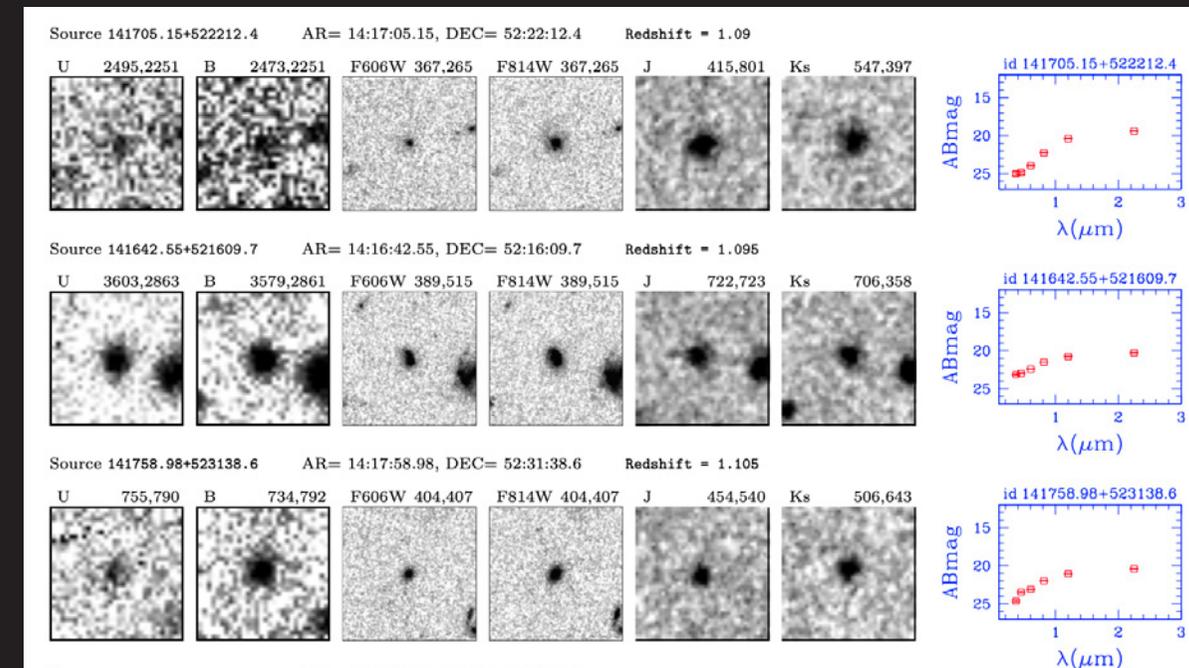
Realizamos más estudios al respecto, entre ellos comparamos las predicciones de cuentas de galaxias de varios modelos en 9 filtros diferentes (desde el UV hasta el IR) con las cuentas observadas en dichos filtros, y sólo aquellos modelos que consideran una formación tardía de las galaxias tempranas, como los EM06 y EM10, reproducen las cuentas en todos los filtros simultáneamente (Prieto & Eliche-Moral 2015).

Podemos concluir que una fracción sustancial de las galaxias tempranas masivas se formó por fusiones mayores de otras galaxias, mayoritariamente en edades medias del Universo, en concordancia con el escenario “downsizing” de formación de galaxias, y que el cambio de pendiente de las cuentas en K y la ausencia del mismo en bandas ópticas son vestigios observacionales de estos procesos.

MERCEDES PRIETO MUÑOZ,  
astrofísica y exprofesora de la ULL



Galaxias en diferentes fases de fusión, todas ellas altamente enrojecidas. © Hubble Space Telescope. NASA/Agencia Espacial Europea. Composición con datos de los telescopios James Webb, Spitzer y Hubble. © NASA



## GOYAPh

### Cartografiado fotométrico para el estudio de galaxias lejanas en el Universo

Las observaciones de galaxias situadas a distancias cada vez más lejanas nos permiten verlas cuando eran cada vez más jóvenes y así obtener información para poder reconstruir su historia. Su estudio implica el uso de telescopios cada vez más grandes e instrumentos cada vez más sofisticados. El avance en este campo sobre la evolución de las galaxias ha ido en paralelo a los cartografiados o mapeos profundos realizados, muchos de ellos liderados por instituciones españolas o fruto de colaboraciones entre científicos españoles y extranjeros.

En los años 90, no existían espectrógrafos en el infrarrojo cercano (NIR) asociados a telescopios de gran apertura para poder observar galaxias cuando el Universo tenía aproximadamente la mitad su edad actual, esto es, las situadas a distancias entre  $z=1$  y  $z=2$ . La radiación óptica de estas galaxias es convertida en infrarrojo al llegar a la Tierra debido al desplazamiento al rojo de sus longitudes de onda. Este rango de distancias es el llamado “desierto en el

desplazamiento al rojo” porque podíamos observar galaxias a distancias menores en el óptico y a distancias mayores en radio y en la línea Lyman-alfa detectada en el óptico, pero no se podían observar galaxias a distancias intermedias.

Por otra parte, el Gran Telescopio Canarias (GTC) empezaba a ser una realidad. Así que hacer espectros de estas galaxias en el infrarrojo cercano (NIR) se convirtió en un sueño posible, aunque suponía superar grandes retos tecnológicos.

### PROYECTO “COSMOS”/“GOYA”

Consciente de todo esto, en enero de 1998, **Rafael Guzmán**, como Investigador Principal (IP), presentó una Carta de Intención EMIR\_COSMOS a Grantecan. Fue un caso científico-instrumental para que un espectrógrafo multiobjeto en el infrarrojo cercano (EMIR) llevara a cabo COSMOS, un estudio espectroscópico NIR de galaxias con formación estelar a desplazamientos al rojo mayores de 1,

Figura 1. Muestra de los datos del catálogo fotométrico GOYAPh. En una misma zona del cielo se compilaron imágenes en seis bandas: U, B (telescopio INT), V, I (telescopio HST) y J, Ks (telescopio WHT). Cada fila muestra la imagen de una galaxia en las seis bandas. Los seis datos fotométricos permiten establecer su distribución espectral de energía, mostrada para cada galaxia en los recuadros azules a la derecha. La abrupta caída del flujo en longitudes de onda debajo de 1 micra es característico de galaxias con desplazamiento al rojo de  $z \sim 1,0$ .

a realizar por un equipo internacional. El equipo estaba formado por **Marc Balcells** (IAC), **Jesús Gallego** (UCM) **Rafael Guzmán** (UF), **Roser Pelló** (UT) y **Mercedes Prieto** (ULL-IAC). En 2002 se incorporaron **Nicolás Cardiel** (UCM) y **Francisco Garzón** (ULL-IAC), y un representante de LAM (Francia), en este orden sucesivo: **Bruno Milliard** (2004), **Laurence Tresse** (2007), **Stephane Harnouts** (2016) y **Cecile Gry** (2015). Desde 2000 a 2006, Marc Balcells fue el IP, después retomado por Rafael Guzmán, y desde 2016 hasta 2020, Marc Balcells y Mercedes Prieto, respectivamente, han estado coordinando el proyecto.

El proyecto científico COSMOS se concibió como la principal justificación científica de la construcción de EMIR para el GTC. La solidez del caso científico-instrumental llevó a Grantecan a seleccionar EMIR como Instrumento de Día Uno, a pesar del gran desafío técnico que representaba. En febrero del 2004, se adoptó el acrónimo GOYA (*Galaxy Origins and Young Assembly*) para distinguirlo del muestreo COSMOS con HST, liderado por **Nicholas Scoville**.

El proyecto GOYA pretende estudiar el Universo a alto desplazamiento al rojo con EMIR. Varios programas científicos utilizarán GOYA para abordar cuestiones clave sobre la evolución cosmológica de las galaxias, incluida la historia de formación estelar de galaxias de baja masa, poblaciones estelares, la función inicial de masas de las galaxias más masivas, las galaxias de formación estelar primordiales y cosmología.

El equipo activo de GOYA ha estado trabajando incesantemente en el proyecto todos estos años desde la presentación del mismo: estudios y evolución de la ciencia a realizar, preparación de las observaciones,

reducción y análisis de los datos. Se han hecho bastantes observaciones de campo profundo. **Cristina Cabello**, doctoranda de Jesús Gallego y Nicolás Cardiel, se encargó de la reducción de las imágenes y la construcción de una base de datos; además, analizó los datos de las galaxias azules, formando todo ello parte de su tesis doctoral. **Elham Eftekhari**, doctoranda de **Alejandro Vazdekis**, preparó la reducción y análisis de los datos de las galaxias rojas; y **Nicolás Laporte** se ocupó de la reducción y análisis de las galaxias primordiales. También se realizó un cuarto mapeo en los filtros U y B del óptico con el telescopio INT. De esta forma, y junto con datos del HST, en una misma zona del cielo se compilaron seis filtros de interés (Figura 1). Todo estaba preparado para, por fin, con mucha ilusión, abordar la ciencia de GOYA, que se podrá llevar a cabo por completo con el nuevo detector de EMIR, ya en fase de pruebas.

#### BASE DE DATOS

Con el fin de generar una base de datos y catálogos propios para seleccionar las galaxias a observar con EMIR-GTC se diseñó el Cartografiado Fotométrico GOYA (GOYAPh), y en el año 2000 se hicieron tres mapeos para la detección de galaxias en el IR: uno, bajo la dirección de Marc Balcells, en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en La Palma; otro, bajo la dirección de Jesús Gallego, en el Observatorio de Calar Alto (CAHA), en Almería; y el tercero, el *WIRCam Ultra Deep Survey (WUDS)*, liderado por Roser Pelló, en el Observatorio Canadá-Francia-Hawái (CFHT). Estos mapeos fotométricos profundos fueron los primeros realizados en España en el NIR para detectar galaxias a alto y muy alto desplazamiento al rojo.



Telescopio William Herschel © Daniel López/IAC. El telescopio de 3,5 m del CAHA © Digigalos, CC BY-SA 3.0 . Y el telescopio CFHT © Marcel VanDalfsen at English Wikipedia, CC BY-SA 3.0

En el mapeo de La Palma, con las cámaras INGRID y LIRIS (filtros K y J) en el Telescopio William Herschel y durante los años 2000 a 2004, se observó un área de ~0,5 grados cuadrados (Cristóbal-Hornillos 2003). El mapeo en Almería, con la cámara OMEGA-PRIME (filtros K) en el telescopio de 3,5 m de CAHA y durante los años 2000 y 2005, cubrió un área de ~0,25 grados cuadrados (Barro et al. 10). El mapeo de Hawái, con la cámara ultra profunda WIRCam (filtros Y, J, H and K) en el telescopio CFH y en el año 2008, cubrió un área de ~400 minutos de arco cuadrados (Pelló et al. 2018).

Usando los datos fotométricos obtenidos con GOYAPh, se realizaron numerosos estudios de base fotométrica, muchos de ellos en preparación para el futuro muestreo GOYA espectroscópico con EMIR.

Entre otros estudios destacan: cuentas de galaxias en la banda K, parte de la tesis de **David Cristóbal-Hornillos**, en la que se mostró un cambio en la pendiente que hacía necesaria la formación de elípticas masivas a  $z \sim 2$  (Cristóbal-Hornillos et al. 2003); las cuentas de galaxias en los filtros U y B junto con K, parte de la tesis de **María del Carmen Eliche**, que apuntan a una formación de las galaxias tempranas por fusiones mayores de galaxias disco (Eliche-Moral et al. 2006); bulbos de galaxias discos a *redshifts* intermedios, tesis de **Lilian Domínguez**: ¿son los bulbos estructuras antiguas

similares a galaxias elípticas o productos más jóvenes de la evolución de sus discos anfitriones? (Domínguez-Palmero et al. 2008); determinación de fracciones de fusiones mayores de galaxias en diferentes edades del Universo, tesis de **Carlos López** (López-Sanjuan et al. 2009). Sobre la naturaleza de las cuentas numéricas en la banda K, parte de la tesis de **Guillermo Barro** (Barro et al. 2009); la formación temprana de las galaxias E-S0 masivas por medio de fusiones mayores, modelo y observaciones (Eliche-Moral et al. 2010; Prieto et al. 2013; Prieto & Eliche-Moral 2015); determinación de la Función de Luminosidad en el UV a  $z \sim 5$  y 6 (Pelló et al. 2018).

Los catálogos GOYAPh permitieron nuestros primeros estudios espectroscópicos de fuentes cosmológicas. Fue espectroscopía en el rango óptico, con OSIRIS en el GTC. Estos trabajos constituyeron la tesis de **Jesús Martínez Manso**, de la Universidad de Florida (Martínez Manso et al. 2011) y de la tesis de **Luis Peralta de Arriba** (Peralta de Arriba et al. 2015). En ambos casos, a través de mediciones de dispersión de velocidades se pudieron trazar caminos evolutivos de las galaxias en los últimos 8 mil millones de años de evolución del Universo.

Equipo de GOYA



A la izquierda, miembros del Consorcio EMIR, incluyendo el Equipo de GOYA, y la gestora técnica de EMIR. A la derecha, asistentes al taller organizado en 2019 en el IAC por el Equipo de GOYA: "Aprendiendo a reducir datos de MOS EMIR", usando el código desarrollado en la UCM. © IAC.

# Estrellas y blázares en el infrarrojo

La región de las nebulosas de Norteamérica y el Pelicano, donde se encuentran dos de las estrellas eruptivas estudiadas. © Daniel López/IAC

El infrarrojo es una longitud de onda fundamental cuando observamos muchos de los fenómenos astrofísicos en el Universo. En concreto, las estrellas jóvenes de baja masa y los blázares son dos campos de estudio en los que ha sido fundamental la contribución de investigadores del IAC, liderados por **José Acosta Pulido**, e instrumentos infrarrojos en telescopios de los Observatorios de Canarias, como CAIN y LIRIS, en el TCS y el WHT, respectivamente.

## ERUPCIONES ESTELARES

En el caso de las estrellas jóvenes de baja masa, que se caracterizan sobre todo por su actividad eruptiva, y fruto de una colaboración del IAC con el Observatorio Konkoly de Budapest (Hungria), se ha trabajado en la investigación de los estallidos de diferentes estrellas, como HBC 722 y VSX J205126.1+440523, situadas en el complejo de las nebulosas del Pelicano y Norteamérica, en la constelación del Cisne, y de V1647 Ori y V862 Aur, en las constelaciones de Orión y el Cochero, respectivamente. En estos trabajos, las curvas de luz derivadas a partir de las mediciones fotométricas de la luminosidad infrarroja de las estrellas realizadas en diferentes periodos de tiempo mostraron que los procesos eruptivos se deben a las inestabilidades en los discos de acreción circunestelares que rodean a este tipo de objetos. El estudio detallado de estos estallidos puede contribuir a la comprensión de las fases más importantes de la evolución estelar temprana.

Además, la espectroscopía infrarroja, con su capacidad de penetrar en las densas nubes de polvo que rodean a estas estrellas jóvenes, también ha permitido caracterizar la estructura y extensión de dichas nebulosas, como en el caso de V1647 Ori, determinando, por ejemplo, que la envoltura alrededor de esta estrella tiene un tamaño de unos 9.000 millones de kilómetros. Adicionalmente, sin la ayuda de las observaciones infrarrojas sería muy difícil completar el seguimiento de la variabilidad del brillo de estos objetos para poder catalogarlos de manera adecuada en las diferentes clases de estrellas eruptivas de baja masa.

### REFERENCIAS:

-Acosta-Pulido, J.A. et al. (incluye a R. Barrena Delgado, A. Manchado y C. Ramos Almeida) (2007). "The 2004-2006 Outburst and Environment of V1647 Ori". *AJ*, 133, 5, 2020-2036.  
 -Kóspál, Á. et al. (incluye a J.A. Acosta-Pulido y M.J. Arévalo Morales) (2011). "The outburst and nature of two young eruptive stars in the North America/Pelican Nebula Complex". *A&A*, 527, A133, 9 pp.  
 -Zsidi, G. et al. (incluye a J.A. Acosta-Pulido y M.J. Arévalo Morales) (2019). "The weakening outburst of the young eruptive star V582 Aur". *ApJ*, 873, 130.



Impresión artística de la nebulosidad alrededor de la estrella eruptiva V1647 Ori. © NASA/CXC/GSFC/K. Hamaguchi et al.

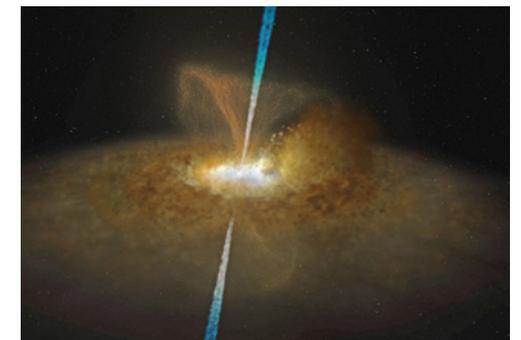
Información elaborada por ÁNGEL GÓMEZ ROLDÁN, director de la revista *Astronomía*

## CHORROS RELATIVISTAS EN NÚCLEOS ACTIVOS DE GALAXIAS

Si hablamos de los blázares, que son núcleos galácticos activos y poderosas fuentes de radiación, la mayoría aparecen como fuentes luminosas caracterizadas por cambios notables y rápidos en el brillo en todas las frecuencias debido a la emisión colimada de un chorro a velocidades relativistas. En colaboración con el Observatorio Astrofísico de Turín, en Italia, y el Whole Earth Blazar Telescope, se ha realizado un seguimiento en el óptico y en el infrarrojo cercano de este tipo de objetos para determinar sus propiedades infrarrojas. Por ejemplo, en un trabajo publicado en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, se estudiaron las curvas de luz de casi una treintena de blázares brillantes con el objetivo de comprender la interacción entre los diferentes componentes de las emisiones de estos objetos. Otra muestra de este tipo de estudios, que ilustra el poder de las observaciones multifrecuencia donde el infrarrojo juega un papel relevante, es la del blázar PG 1553+113, en la constelación de la Cabeza de la Serpiente. El análisis de la variabilidad de su flujo en 2015 y con otros tres años de datos permitió caracterizar algunas propiedades del chorro de emisión, ayudando así a refinar los modelos existentes. Por último, en una publicación en *Nature* sobre el blázar CTA102, ubicado en la constelación de Pegasus, y observado igualmente en multifrecuencia, los investigadores proponían que las tendencias a largo plazo observadas del flujo y la variabilidad espectral se explican mejor por un chorro curvo no homogéneo que sufre cambios de orientación con el tiempo. Se ha sugerido que dichos cambios en el ángulo de visión son una explicación a los eventos de erupciones como la registrada en 2016-2017, que hizo aumentar de brillo al blázar en nada menos que seis magnitudes.

### REFERENCIAS:

-Raiteri, C.M. et al. (incluye a J.A. Acosta-Pulido, M.J. Arévalo, C. Lázaro, I. Puerto Giménez y S. Velasco) (2014). "Infrared properties of blazars: putting the GASP-WEBT sources into context". *MNRAS*, 442, 629-646.  
 -Raiteri, C.M. et al. (incluye a J.A. Acosta-Pulido) (2017). "Blazar spectral variability as explained by a twisted inhomogeneous jet". *Nature*, 552, 7685, 374-377.  
 -Raiteri, C.M. et al. (incluye a J.A. Acosta-Pulido y M.J. Arévalo) (2017). "Synchrotron emission from the blazar PG 1553+113. An analysis of its flux and polarization variability". *MNRAS*, 466, 3, 3762-3774.



Impresión artística de un núcleo galáctico activo como el de un blázar. © ESO/M. Kornmesser y L. Calçada.

# Observando agujeros negros en el infrarrojo

En 2020, un equipo de investigadores del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) observó por primera vez la emisión constante en el rango infrarrojo de vientos producidos durante la erupción de un agujero negro en una binaria de rayos X. Hasta entonces, solamente se habían detectado estos flujos de materia en otros rangos espectrales, como los rayos X y el visible, dependiendo del momento en que el agujero negro consume la masa a su alrededor. El estudio mostraba la primera evidencia de que los vientos están presentes a lo largo de toda la evolución de la erupción, independientemente de la fase en la que se encuentre. Un paso más para comprender el funcionamiento de estos enigmáticos procesos de acreción en agujeros negros de masa estelar.

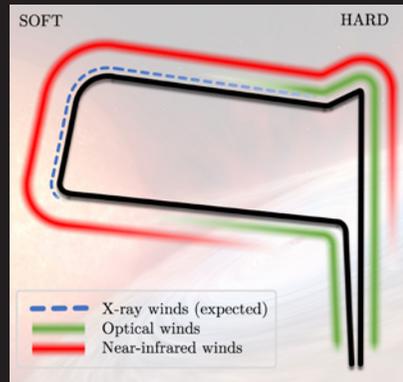


Diagrama color-luminosidad en rayos X del agujero negro MAXI J1820+070 (negro, línea continua). Las diferentes trazas indican detecciones de viento en diferentes longitudes de onda a lo largo de todo el estallido.

Los agujeros negros son objetos maravillosos. Debido a sus características, tan extremas y únicas, sorprenden y fascinan por igual. Aunque pueden llegar a tener masas de millones de veces la masa del Sol, en el Grupo de objetos compactos del IAC nos centramos en el estudio de los agujeros negros de masa estelar (con alrededor de 10 masas solares). Estos agujeros negros serían prácticamente indetectables en caso de estar aislados. Por tal motivo, los que estudiamos se encuentran en sistemas binarios, donde el agujero negro está acompañado de una estrella de secuencia principal. La cercanía de ambos objetos provoca que parte de la masa de la estrella caiga en el campo gravitatorio del agujero negro, formando un disco de acreción. En la parte más interna de dicho disco, el gas se calienta, debido al rozamiento viscoso, hasta alcanzar millones de grados y termina emitiendo radiación en rayos X. Es así, mediante la detección de esta radiación, cómo descubrimos este tipo de sistemas a los que llamamos binarias de rayos X con agujero negro (BHXRBS, por sus siglas en inglés). Las BHXRBS son laboratorios de eventos físicos extremadamente energéticos que el Universo pone a nuestra disposición para ser estudiados.

La existencia de las BHXRBS se conoció por primera vez a mediados del siglo pasado. Desde entonces se han descubierto poco más de medio centenar. Durante ese tiempo hemos avanzado en nuestro entendimiento de estos exóticos objetos, que pasan gran parte de su vida en un estado de quietud, durante el cual se acreta poca cantidad de masa procedente de la estrella compañera. Ocasionalmente, el sistema entra en erupción y su brillo aumenta varios órdenes de magnitud, así como la cantidad de masa transferida hacia el agujero negro.



Recreación artística de la emisión constante de vientos producidos durante la erupción de un agujero negro en una binaria de rayos X.  
© Gabriel Pérez Díaz, SMM (IAC).

## ¿QUÉ OCURRE DURANTE UNA ERUPCIÓN?

La duración de una de estas erupciones puede ir desde pocas semanas a varios meses, durante la cual tenemos la oportunidad de estudiar cómo se comporta la materia alrededor del agujero negro. Cuando una binaria de rayos X entra en erupción puede pasar por lo que llamamos distintos estados de acreción. Los dos principales son: el estado *soft* (la emisión del sistema está dominada por el disco de acreción) y el estado *hard* (aparece alrededor del agujero negro una corona de electrones que se mueven a velocidades relativistas).

Uno de los eventos más significativos durante estos procesos eruptivos es la expulsión de material y momento angular desde el sistema, a lo que llamamos “vientos”. Hace ya dos décadas se descubrieron vientos en el rango de los rayos X, observados durante el estado *soft*, mientras que durante el estado *hard* únicamente observábamos emisiones en forma de radio-jets. Unos años más tarde, un equipo del IAC descubrió vientos en el rango visible del espectro, que se observaban durante el estado *hard*, al mismo tiempo que los mencionados radio-jets. Todas estas pistas que nos va dejando este material emitido en forma de vientos cobran más sentido cuando adoptamos un nuevo punto de vista desde el que mirar: el infrarrojo.

## CON “GAFAS” INFRARROJAS

Hasta hace menos de un lustro, pocos eran los trabajos que se habían realizado en el rango infrarrojo sobre agujeros negros en binarias de rayos X. Un ejemplo de ello serían algunos estudios sobre GX 339-4, una de las BHXRBS más importantes y analizadas. En ellos se establecía la existencia de una correlación entre rayos X e infrarrojo, así como una primera muestra de que las líneas de infrarrojo podrían dar indicios de presencia de viento que no era visible en otros rangos, como por ejemplo el óptico. Por todo ello, nuestro grupo de objetos compactos del IAC inició una serie de campañas de observación infrarroja con el objetivo de desvelar más detalles sobre el funcionamiento de las erupciones y la acreción en estos sistemas. Sin embargo, la importancia del infrarrojo en estos estudios ya venía sugerida por varios observables de los que se tenía conocimiento. Por ejemplo: la fuerte relación existente entre la emisión infrarroja y el comportamiento de la zona más compacta del jet (es decir, la más cercana al agujero negro) o la distinta sensibilidad de las transiciones del infrarrojo a las características físicas del material donde se producen.

Fruto de todo este esfuerzo, en 2020 publicamos un trabajo en el que se detectó por primera vez viento en el infrarrojo, que además se observaba durante los distintos estados de acreción a lo largo de toda la erupción, tanto en el *hard* como en el *soft*. Fue en el sistema MAXI J1820+070, una BHXRBS descubierta en 2018 y que tuvo gran relevancia por su relativa proximidad (~ 3 kpc) y su baja extinción. Además, las características cinéticas del viento infrarrojo detectado coincidían con las del viento observado en el mismo sistema un año antes, pero en el rango óptico durante el estado *hard*. Todo esto cambió la imagen general de viento que teníamos hasta entonces, pasando de unas detecciones aisladas

en diferentes rangos espectrales al concepto de un viento que está presente de forma continua durante la erupción y que se detecta en uno u otro rango dependiendo de sus características físicas.

Después de este estudio se han publicado otros que apuntan en la misma dirección. Un ejemplo sería el trabajo sobre MAXI J1348-630, en el que se observaron vientos ópticos e infrarrojos simultáneos, aun siendo un sistema de inclinación baja-medía. Esto último lo diferencia del resto de sistemas donde se observan vientos, que suelen ser de alta inclinación. Otro buen ejemplo sería el trabajo sobre MAXI J1803-298. Utilizando los espectrógrafos OSIRIS (GTC) y X-shooter (VLT) para estudiar el sistema, se observaron indicios de vientos tanto en óptico como en infrarrojo.

Aun así, quedan muchísimas cuestiones por responder respecto a los mecanismos físicos de la acreción, sobre cómo se transfiere la materia que cae al agujero negro y todo lo que ocurre a su alrededor. Actualmente, se está trabajando en muchas de ellas, las cuales esperamos poder responder en los próximos años. Algunos ejemplos de las más relevantes serían: ¿qué influencia tienen los vientos en la evolución de una erupción?, ¿se relaciona la forma en cómo observamos los vientos con la inclinación del sistema?, ¿y con el estado de acreción?, ¿cómo se relaciona la región más compacta del jet con la emisión en el infrarrojo?...

El rango infrarrojo apenas nos ha mostrado una parte de su potencial para futuros descubrimientos y será clave para responder estas y otras tantas preguntas. Para ello disponemos de un potente aliado en esta empresa: el espectrógrafo infrarrojo EMIR, situado en el Gran Telescopio Canarias. Nuestro grupo está utilizando actualmente dicho instrumento para estudiar el agujero negro del sistema GRS 1915+105, que tiene a su alrededor uno de los discos de acreción más grandes conocidos y ha estado en erupción durante más de 25 años. Estos estudios, junto con otros que estamos realizando con EMIR, auguran un emocionante futuro de descubrimientos en este interesante campo.

JAVIER SÁNCHEZ SIERRAS,  
estudiante de doctorado del IAC/ULL  
Directores de tesis: Teo Muñoz Darías y Jorge Casares

## REFERENCIAS:

- Sobre vientos fríos:
  - Muñoz-Darías, T.; Casares, J.; Mata Sánchez, D.; Fender, R.P.; Armas Padilla, M.; Linares, M.; Ponti, G.; Charles, P.A.; Mooley, K.P.; y Rodríguez, J. (2016). "Regulation of black-hole accretion by a disk wind during a violent outburst of V404 Cygni". *Nature*, 534, 7605, 75-78.
- Sobre vientos infrarrojos:
  - Sánchez-Sierras, J.; y Muñoz-Darías, T. (2020). "Near-infrared emission lines trace the state-independent accretion disc wind of the black hole transient MAXI J1820+070". *A&A*, 640, L3, 7 pp.
  - Panizo-Espinar, G.; Armas Padilla, M.; Muñoz-Darías, T.; Koljonen, K.I.I.; Cúneo, V.A.; Sánchez-Sierras, J.; Mata Sánchez, D.; Casares, J.; Corral-Santana, J.; Fender, R.P.; Jiménez-Ibarra, F.; Ponti, G.; Steeghs, D.; y Torres, M.A.P. (2022). "Discovery of optical and infrared accretion disc wind signatures in the black hole candidate MAXI J1348-630". *A&A*, 664, A100, 9 pp.

# El "apogeo" de la espectroscopía estelar en el infrarrojo

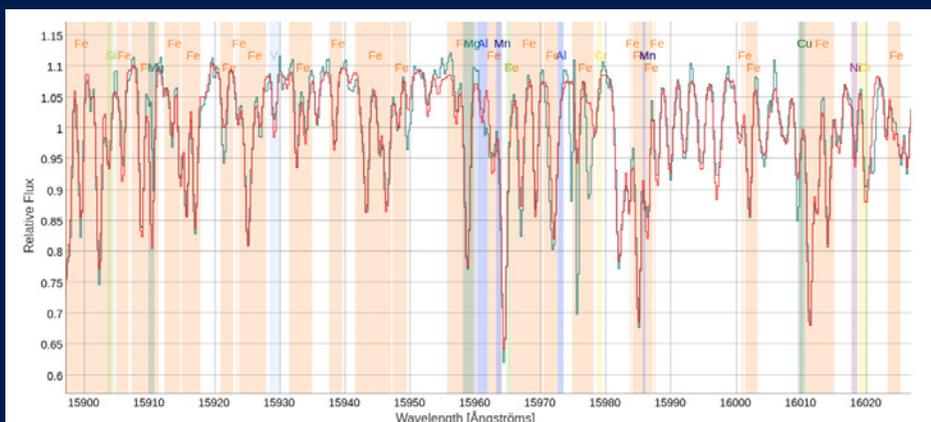
Los espectros no son más que la descomposición en colores de la luz y, cuando los colores de la luz de las estrellas se separan mucho (lo que se conoce como "espectroscopía de alta resolución"), podemos utilizarlos para medir la composición química de las estrellas y descifrar la formación y evolución de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Los instrumentos de alta resolución en uso hace una década eran capaces de observar una estrella de cada vez, y este tipo de medidas se realizaba casi exclusivamente en el rango visible de la luz, aquel que es capaz de percibir el ojo humano, pero que el polvo del disco de nuestra galaxia absorbe y no deja pasar. Por estos motivos, las muestras de estrellas para las que conocíamos su composición química eran pequeñas y, prácticamente, se limitaban a la vecindad del Sol. Quedaba mucha galaxia por explorar.

Cuando a **Steve Majewski**, del Departamento de Astronomía de la Universidad de Virginia (EEUU), se le ocurrió en 2005 tomar espectros de alta resolución de cien mil estrellas de la Vía Láctea, no había más que unos miles de medidas de este tipo en los archivos astronómicos de todo el mundo.

El equipo de ingeniería del proyecto de Majewski, liderado por **John Wilson**, presentó un innovador diseño de un espectrógrafo infrarrojo capaz de medir los espectros de 300 estrellas de manera simultánea. La luz infrarroja pasa con mucha más facilidad que la visible a través del polvo interestelar, permitiéndonos ver estrellas que están mucho más lejos, hasta cientos de miles de años luz. Majewski negoció la instalación de este instrumento en el telescopio de 2,5 m del *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), el más moderno de gran campo y que llevaba en operación desde 2000, con un campo útil 36 veces mayor que el tamaño angular de la Luna. Iban a revolucionar esta rama de la astronomía moderna.

Un problema por resolver era que los modelos físicos de los espectros estelares habían sido desarrollados durante casi un siglo para el rango visible, no para el infrarrojo. Los datos atómicos necesarios y la experiencia, simplemente no existían, así que hubo que ponerse a trabajar en actualizarlos. Por fortuna, el proyecto contó con la participación de espectroscopistas con muchas tablas, como **Katia Cunha**, **Matthew Shetrone** y **Verne Smith**.

Figura 1: Detalle de uno de los espectros observados por APOGEE (curva azul). La curva roja corresponde al modelo ajustado automáticamente por FERRE. Las etiquetas identifican los elementos químicos asociados a cada una de las líneas espectrales. En este pequeño fragmento del espectro, tan solo un 5% del que mide APOGEE, se detectan líneas de hierro, aluminio, manganeso, cromo, magnesio, cobre, níquel y vanadio.



## CÓDIGO "FERRE"

Como las muestras siempre habían sido muy limitadas, los análisis se hacían de manera manual. Esto implicaba un trabajo metódico y cuidadoso de selección, medición y comparación iterativa con modelos. De ahí que el procesado de datos fuera demasiado difícil para analizar una muestra de 100.000 estrellas en un período de tiempo razonable. Yo acababa de publicar un par de artículos sobre el análisis automatizado de espectros y había desarrollado un código de optimización que llamé FERRE, que es como se conoce en algunas zonas de Asturias a las aves rapaces de pequeño tamaño. Entonces ya existían otros programas para tal fin, pero éstos calculaban los modelos sobre la marcha, lo que requería minutos de cómputo por modelo. FERRE utiliza una malla de espectros precalculados que se guardan en memoria y produce los modelos por interpolación en milésimas de segundo, acelerando dramáticamente el proceso de análisis. En enero de 2008, durante la reunión anual de la Sociedad Americana de Astronomía en Texas, **Ricardo Schiavon**, aliado de Majewski en el proyecto, me propuso adaptar el programa para el análisis de los datos de APOGEE (*Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment*), que era como se había bautizado el proyecto. No tardó ni cinco minutos en convencerme.

Cuando arrancó APOGEE, en 2011, la maquinaria del SDSS estaba ya muy engrasada, tras una década de operaciones haciendo imagen y espectroscopía óptica. Cada 2-3 horas se cambiaba la placa focal, donde se habían hecho cientos de agujeros para acoplar las fibras ópticas que llevaban la luz a los instrumentos. En una noche despejada, APOGEE adquiriría más de 1.000 espectros. El tiempo se repartía al principio entre tres proyectos, cada uno con un instrumento diferente, pero al pasar un año uno de los proyectos se descartó por problemas técnicos. Un año más tarde, otro proyecto alcanzaba sus objetivos y cedía su tiempo remanente a APOGEE, que iba cada vez más rápido tras introducir varias mejoras en las operaciones. Al concluir los tres años de observaciones previstos, la muestra ya sobrepasaba las 160.000 estrellas, superando notablemente las expectativas iniciales. El análisis estaba automatizado, usando FERRE, con un complejo sistema de software a su alrededor, cuya primera versión desarrollaron **David Nidever** y **Ana Elia García Pérez**, y que luego mejoraría **Jon Holtzmann**.

Los espectros infrarrojos de APOGEE son muy ricos en información y nos permiten determinar las abundancias de más de 15 elementos químicos en cada estrella. Estas mediciones se hacen a partir de la intensidad de líneas de absorción producidas por el carácter cuántico de los átomos. En la Figura 1 se muestra una pequeña parte de uno de los espectros. La curva azul es el espectro observado, y la roja, el modelo ajustado automáticamente por FERRE.

Tras la primera fase del proyecto, que concluyó en 2014, nos dimos cuenta del gran impacto que estaba teniendo APOGEE, y no fue difícil encontrar financiación para una segunda etapa, en la que la muestra se iba a extender notablemente. Las observaciones se estaban realizando desde el Observatorio Apache Point, en Nuevo México, aproximadamente a la misma latitud que Canarias. Este punto de observación tiene una desventaja, y es que no permite llegar bien a algunas partes de la Vía Láctea, en concreto a las zonas centrales, que se observan mejor desde el hemisferio sur y guardan importantes secretos, como un agujero negro de millones de masas solares. La solución era construir un segundo instrumento que observaría desde el Observatorio de Las Campanas, en Chile. Además, al operar en paralelo, se duplicaría el ritmo de adquisición de datos.

El segundo instrumento no fue tan fácil como esperábamos. Primero, la sismicidad de Chile obligó a cambios en el diseño. Segundo, la fabricación de las lentes de silicio de APOGEE se vio afectada por una inesperada subida de precios de este metal. Tercero, el telescopio asignado estaba anticuado. El instrumento se construyó y comenzó sus operaciones en 2017, usando el telescopio Irénée du Pont. Las dificultades técnicas de un telescopio construido en 1977 se compensaron, sin embargo, con la mejor calidad de imagen del cielo de Las Campanas.

APOGEE concluyó sus observaciones en enero de 2021 y los datos se hicieron públicos un año más tarde. El resultado: espectros, parámetros atmosféricos y abundancias químicas de unos 15 elementos químicos para más de 650.000 estrellas. Estas estrellas, principalmente gigantes rojas, se muestran como puntos en la Figura 2, sobre una representación artística de la Vía Láctea vista desde el polo norte galáctico, es decir, desde "arriba". En esta figura se indica con un círculo azul la región de la galaxia cubierta por los mapas espectroscópicos de alta resolución realizados antes de 2010. Las estrellas de APOGEE no sólo se concentran en el plano galáctico, donde son más útiles los datos infrarrojos por la elevada concentración de polvo, sino que cubren todas las direcciones.

APOGEE nos ha revelado la distribución de elementos químicos en la Vía Láctea, lo que permite avanzar en nuestro conocimiento en temas como la formación y evolución de galaxias, la distribución del polvo interestelar, la dinámica del bulbo de la Vía Láctea o el origen de los elementos químicos, que en su mayoría se forjan en los núcleos de las propias estrellas. El proyecto también incluye observaciones de las galaxias más cercanas, algunas en proceso de ser absorbidas por la nuestra. Hasta la fecha se han publicado más de 1.000 artículos con estos datos, que han recibido más de 33.000 citas, lo que da una idea del gran impacto del proyecto.

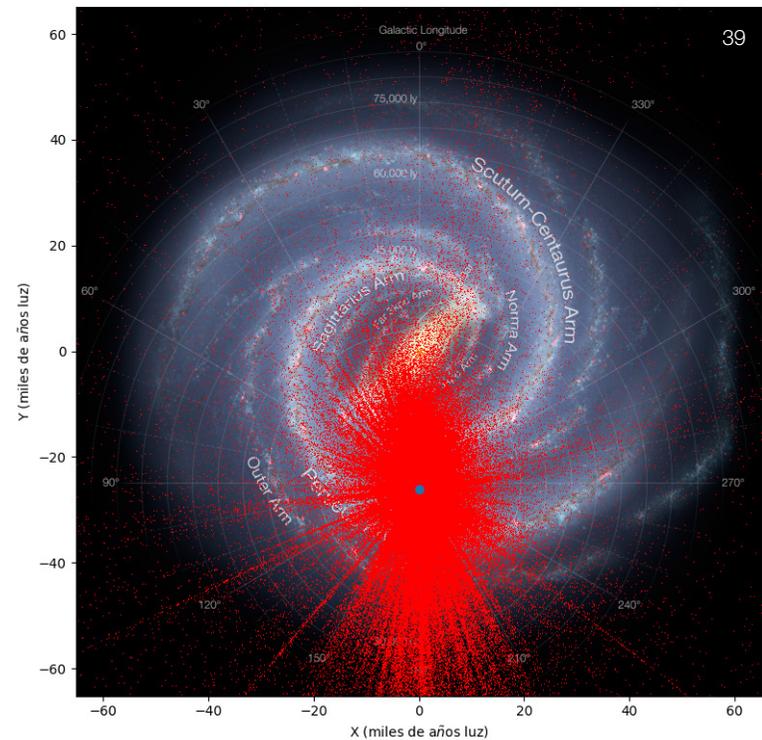


Figura 2: Cada punto rojo muestra una de las estrellas observadas por APOGEE, sobre una visión artística de la Vía Láctea © NASA/JPL-Caltech-ESO-R. Hurt. El centro de nuestra galaxia está en el centro del eje de coordenadas (X=0, Y=0) y la posición del Sol corresponde a (X=0, Y=-26) en unidades de miles de años luz. El círculo azul en la posición del Sol indica el área que estaba explorada con espectroscopía de alta resolución antes de 2010.

Antes de que APOGEE terminara, se inició otro proyecto similar desde el hemisferio sur, GALAH, y hay más que siguen su estela, como WEAVE, que está a punto de comenzar en La Palma, o 4MOST, que operará desde Chile en unos años. Eso sí, estos proyectos trabajan en el rango visible, con lo que los datos de APOGEE tardarán en caducar.

Como el título del artículo sugiere, uno podría pensar que esta explosión de proyectos de cartografiado espectroscópico constituye el apogeo de este campo de investigación. Si APOGEE ha llegado a los 650.000 espectros y los proyectos que siguen observarán varios millones, quizás no sea necesario obtener más datos. Me temo que sería ingenuo pensar así. Tener información detallada sobre millones de estrellas lleva a grandes avances, pero nuestras muestras no dejan de ser una fracción inferior al 0,01 por ciento del total de estrellas de la Vía Láctea. El ritmo de avance en nuestro conocimiento aumenta de manera exponencial. Igual que estamos viviendo una transición desde la economía industrial a la sostenible, es probable que el papel de los humanos en la investigación futura pase de la ejecución a la reflexión, a la búsqueda de interpretaciones coherentes que den sentido a gigantescas bases de datos recogidas principalmente por métodos automatizados y robots. Veremos.

# EL SOL

## Espectropolarimetría solar en el infrarrojo cercano

El Telescopio Solar Europeo (EST) es un proyecto para construir un telescopio con un espejo de 4 metros de diámetro que será instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos para la observación del Sol. Su objetivo científico es el estudio de la interacción del campo magnético con el plasma en la fotosfera y cromosfera (las capas más profundas de la atmósfera solar). Para ello, este telescopio podrá observar el Sol desde el ultravioleta cercano (por encima de 390 nm) hasta el infrarrojo cercano (hasta 2,3 micras). El rango infrarrojo, en particular, presenta varias ventajas. La sensibilidad al campo magnético aumenta con la longitud de onda y, por tanto, este rango espectral permite medir las propiedades y evolución de las estructuras magnéticas con mayor precisión. Asimismo, la calidad de la imagen formada por el telescopio en longitudes de onda largas es menos sensible a la degradación introducida por la turbulencia que rodea a todo telescopio ubicado en Tierra. Estas características, conjuntamente con las propiedades únicas de algunas de las líneas espectrales observables en este rango espectral, hacen que el infrarrojo cercano resulte científicamente muy atractivo. El Grupo solar del IAC tiene una larga trayectoria en observaciones y desarrollos instrumentales en esta banda, lo que le ha llevado a proponer un instrumento para EST basado en la experiencia adquirida.

Hace unos treinta años iniciamos dentro del Grupo solar del IAC una aventura que para nosotros era completamente novedosa y arriesgada: construir dos polarímetros que se



EST es un proyecto liderado por el IAC junto con el consorcio EAST (European Association for Solar Telescopes), formado por 28 instituciones de investigación en física solar pertenecientes a 18 países europeos.

Imagen del diseño preliminar del futuro telescopio EST. © IDOM

podieran acoplar a los espectrógrafos de rendija larga del telescopio SST, del Observatorio del Roque de los Muchachos (LPSP, *La Palma Stokes Polarimeter*) y de los telescopios VTT y GREGORY, del Observatorio del Teide (TIP, *Tenerife Infrared Polarimeter*). Si bien el Grupo solar ya había acumulado hasta entonces unos conocimientos notables a partir de la adquisición y análisis de datos espectropolarimétricos, nuestra experiencia instrumental en este campo era bastante limitada.

La espectropolarimetría es una técnica que mezcla dos herramientas muy poderosas para poder interpretar las propiedades de la luz que nos llega de los objetos celestes y, en particular, del Sol: la espectroscopía y la polarimetría. Mediante técnicas espectroscópicas se descompone la luz para formar su espectro, en el que se pueden identificar los rasgos que dejan los diferentes elementos químicos en forma de líneas espectrales. Estas líneas aparecen en longitudes de onda muy bien definidas y su forma viene determinada por las condiciones (temperatura, densidad, presión...) imperantes en el medio que ha emitido o que ha atravesado la radiación. La presencia de campo magnético también modifica la forma y la polarización de las líneas espectrales. La detección precisa de la forma del perfil de estas líneas y su polarización da lugar a que se pueda determinar la estratificación en la atmósfera solar de parámetros como la temperatura,

densidad, velocidad y campo magnético y estudiar así las propiedades de las diversas estructuras magnéticas solares.

La Figura 1 muestra el aspecto del Sol en tres líneas típicas de la cromosfera (Ca II 393 nm, H $\alpha$  I 656 nm y He I 1.083 nm). Las imágenes fueron tomadas con el telescopio sinóptico alemán CHROTEL del Observatorio del Teide. El aspecto diferente que muestran es debido a la distinta sensibilidad que tienen esas líneas a los parámetros termodinámicos y al campo magnético del plasma solar.

Los instrumentos LPSP y TIP vieron su primera luz en 1998 y se pusieron al servicio de la comunidad el año siguiente. LPSP sólo estuvo operando dos años a partir de entonces, ya que el telescopio SST paró sus operaciones para una profunda renovación en la que su lente primaria pasó de tener 50 cm a 100 cm. Este cambio hacía necesario un rediseño de LPSP para hacerlo compatible con la nueva configuración del telescopio y los trabajos posteriores se concentraron principalmente en las mejoras progresivas de TIP. Aunque TIP era compatible, por diseño, con los dos telescopios alemanes, VTT y GREGORY, poco a poco se fue generalizando su uso en el primero de ellos y se convirtió en instrumento de uso común en él.

TIP fue diseñado para trabajar en tres bandas espectrales: las denominadas J (1,0-1,3 micras), H (1,5-1,8 micras) y K (2,0-2,3 micras), en esta última sólo en espectroscopía y en las dos primeras con polarización. De entre todas las posibilidades, el uso por parte de los investigadores se fue centrando progresivamente en dos regiones espectrales: una, alrededor de 1.083 nm, y otra, en 1.565 nm. La primera región contiene dos rasgos espectrales importantes: la línea de Si I 1.082,7 nm, formada en la fotosfera alta y el triplete de He I 1.083,0 nm, formado en la cromosfera alta (unos 2.000 km por encima de la anterior). De esta manera, TIP permite medir simultáneamente las características

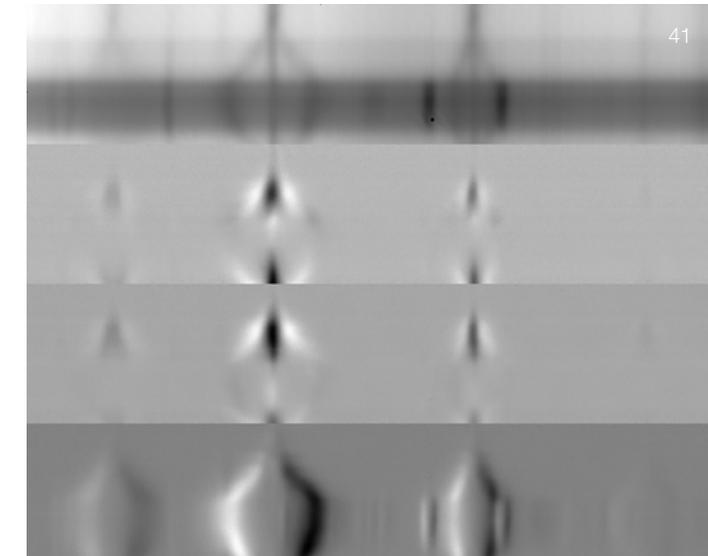


Figura 2: Esta figura muestra las imágenes espectrales en una zona solar que contiene una mancha en la región espectral de 1,56 micras en intensidad (arriba), polarización lineal en dos direcciones (las dos imágenes centrales) y polarización circular (abajo). En ella se puede ver con claridad el desdoblamiento inducido por el campo magnético en las líneas espectrales (el denominado efecto Zeeman), así como la polarización diferente inducida en cada componente. Este comportamiento permite derivar el vector campo magnético (en intensidad y dirección) en los puntos observados. Los datos fueron obtenidos con TIP-II en la VTT.

del plasma en dos alturas diferentes, lo que es de gran utilidad para estudiar la evolución de determinados fenómenos a diferentes alturas (topología 3D del campo magnético, ascenso de estructuras magnéticas, propagación de ondas...). La segunda región espectral contiene, entre otras, la línea espectral de Fe I 1.564,8 nm, formada en regiones profundas de la fotosfera y con una alta sensibilidad al campo magnético (al menos tres veces mayor que cualquier otra línea del espectro visible). Gracias a ella, se han podido determinar las propiedades magnéticas del Sol en las zonas más en calma o las sutiles fluctuaciones del campo magnético producidas

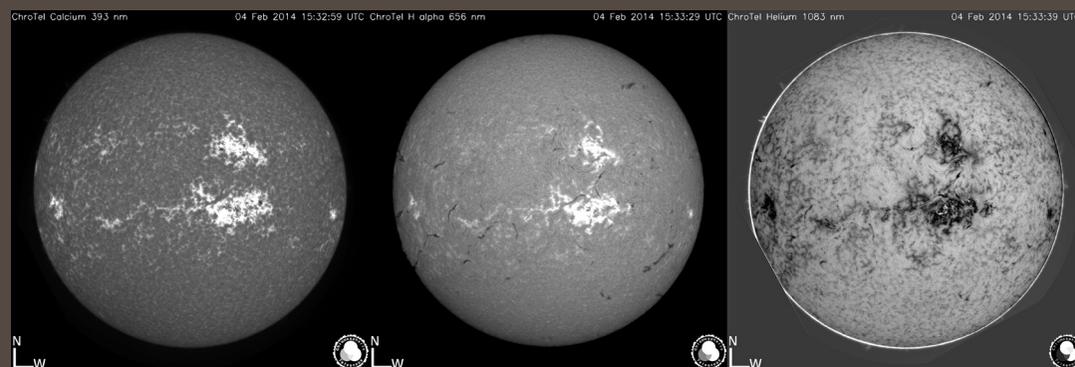
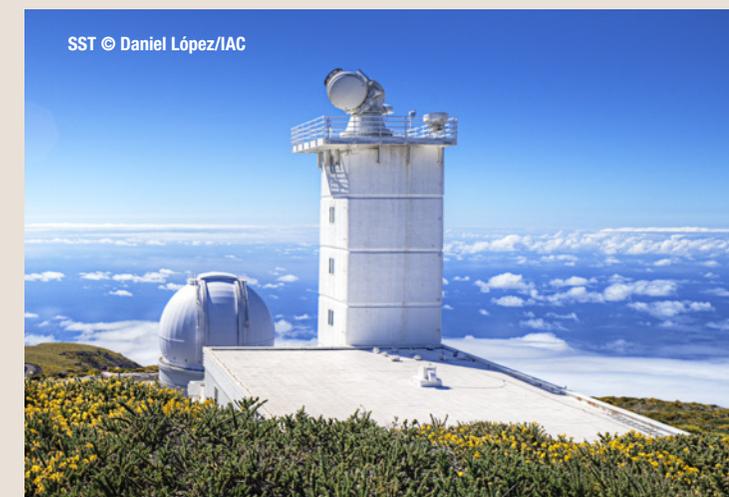


Figura 1: Imágenes del Sol tomadas con el telescopio sinóptico alemán CHROTEL del Observatorio del Teide en tres líneas espectrales cromosféricas. Izquierda: Ca II 393 nm, Centro: H $\alpha$  I 656 nm, Derecha: He I 1083 nm. El aspecto diferente que muestra el Sol en las tres imágenes está relacionado con la diferente sensibilidad y mecanismo de generación de cada línea espectral.



por la propagación de ondas. La Figura 2 muestra un ejemplo del espectro en la región de 1,56 micras en una mancha solar, en el que se puede observar claramente el desdoblamiento y polarización de las líneas espectrales producidas por el efecto Zeeman.

En 2005 se llevó a cabo la primera transformación importante del instrumento, dando lugar a TIP-II. Gracias a una colaboración con el instituto alemán Max Planck für Sonnensystemforschung (por entonces en Lindau y, posteriormente, ubicado en Göttingen), se cambió el detector inicial (un NICMOS de 256x256 píxeles, con velocidad máxima de operación de 8 imágenes/s) por otro más grande y rápido (TCM-8600 de 1.024x1.024 píxeles, con un ritmo de adquisición de hasta 36 imágenes/s). Con esta actualización (y los cambios asociados en su óptica, electrónica, mecánica y control), se pudo alcanzar una mejor precisión polarimétrica, un mayor campo tanto espacial como espectral y una mejor resolución espacial.

En paralelo, el telescopio GREGORY (de 45 cm de apertura) fue desmantelado y, en su lugar, se instaló el telescopio GREGOR (de 1,5 m). Se abrió entonces la puerta para una segunda mejora sustancial con la instalación del instrumento en este telescopio, el mayor de Europa. Conjuntamente con el NST (*New Solar Telescope*, posteriormente denominado *Goode Solar Telescope*, GST), de 1,6 m y ubicado en Big Bear (California, EEUU), serían los telescopios solares más grandes hasta el advenimiento de los telescopios solares de clase 4 metros.

El IAC construyó para GREGOR el espectrógrafo al que acoplar TIP-II. El sistema completo (denominado GRIS, *GRegor Infrared Spectrograph*) vio la primera luz en 2012 y formó parte de la operación regular del telescopio desde 2014. GRIS aunó la versatilidad heredada de sus

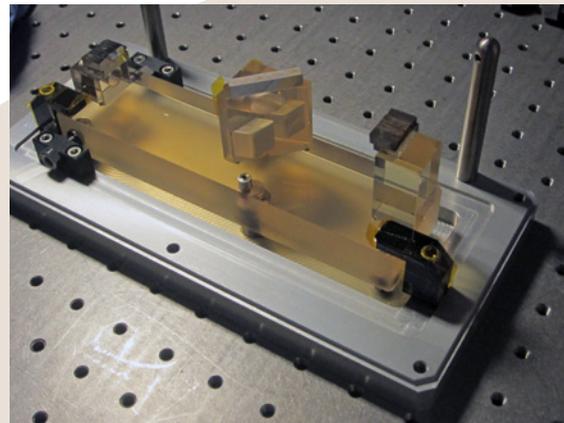
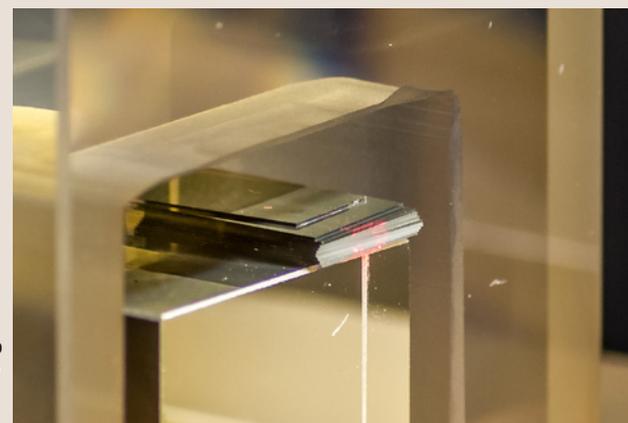


Figura 3a (izquierda): Sistema completo de la unidad de campo integral de GREGOR.

Figura 3b (derecha): Sistema de láminas rebanadoras de la imagen producida por el telescopio GREGOR. Cada lámina tiene una anchura de 1,6 mm y un espesor de 100 micras.



predecesores TIP y TIP-II junto a las capacidades mejoradas de su instalación en un telescopio de mayor apertura, dando lugar a estudios con mejor calidad espacial y mayor precisión.

Tras la primera luz en GREGOR, en 2013, y en el marco del proyecto europeo SOLARNET, se empezó a fabricar, en colaboración con la empresa Winlight Optics (Francia), una unidad de campo integral que permitiera obtener simultáneamente el espectro polarizado de todos los puntos dentro de un campo bidimensional, para eliminar la necesidad de barrido espacial requerido por los sistemas de rendija larga previos. Esta unidad de campo integral está basada en un rebanador de imagen colocado en el plano focal proporcionado por el telescopio. La imagen formada ahí es dividida en subsecciones rectangulares muy finas, que son posteriormente alineadas por un conjunto de espejos colimadores y de cámara de modo que formen una única rendija larga. Esta rendija es utilizada para iluminar el espectrógrafo de manera clásica. La Figura 3a, a la izquierda, muestra la unidad de campo integral con el rebanador y los espejos colimadores y de cámara. En la Figura 3b, a la derecha, se muestran las láminas que actúan como rebanadores de imagen. Su longitud es 1,6 mm y su anchura 100 micras (correspondientes, respectivamente, a 6 y 0,38 segundos de arco sobre la superficie del Sol). La Figura 4 muestra una serie temporal obtenida de una región del Sol en calma con esta unidad de campo integral. El espectro polarizado de todos los puntos del campo fue obtenido simultáneamente.

La unidad de campo integral vio primera luz en el verano de 2017 y fue puesta a disposición de todos los observadores de GREGOR como instrumento de uso común a partir del año 2019.

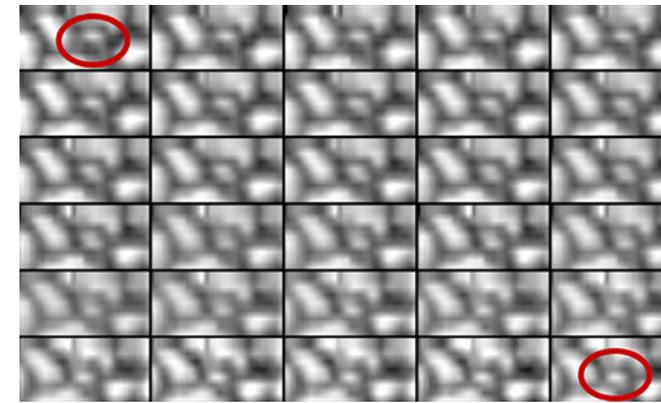
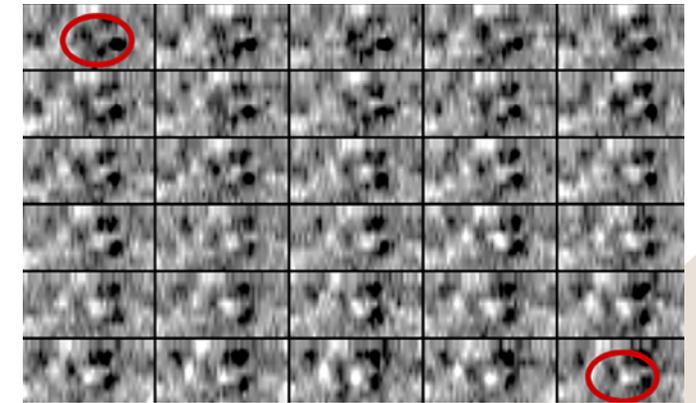


Figura 4: Serie temporal de la granulación solar obtenida en la región espectral de 1.565 nm. El campo de visión es 6"x3". El tiempo varía de izquierda a derecha y de arriba abajo con una cadencia entre imágenes de 4 segundos, para una duración total de la secuencia de 2 minutos. El bloque izquierdo de imágenes muestra 30 imágenes de la intensidad del continuo. El bloque derecho muestra la evolución del magnetograma escalado a  $\pm 0,1I_c$ , donde  $I_c$  es la intensidad media del continuo. Los círculos rojos de la primera y de la última imagen de ambas series temporales indican una región en la que se ha producido una clara evolución de las estructuras granulares y magnéticas.

En la actualidad, se está trabajando en dos líneas de mejoras complementarias. Por una parte, se han diseñado y están en proceso de fabricación dos unidades de campo integral que permitan mejorar la resolución espacial (con láminas rebanadoras más finas) y ampliar el campo de visión simultánea (con varias rendijas de salida). Este desarrollo se enmarca dentro del proyecto europeo SOLARNET H2020 y se realiza en colaboración con el National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ) y las empresas Canon Inc. (Japón) y Winlight Optics (Francia).

La segunda línea de trabajo técnico actual consiste en dotar a GRIS de dos brazos adicionales para poder medir en tres regiones espectrales simultáneamente, con las que poder observar los fenómenos solares a diferentes alturas y poder hacer un análisis más detallado de su evolución y propagación en altura. Estos nuevos brazos extenderán las prestaciones de GRIS hacia el visible (600-700 nm) e infrarrojo de longitud de onda más corta (800-900 nm), mejorando sustancialmente sus posibilidades científicas. Este proyecto está financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto MICAL (Mejoras estratégicas en Infraestructuras Científico-técnicas y de Apoyo Logístico a los Observatorios de Canarias). Los tres brazos espectroscópicos serán compatibles con la rendija larga tradicional y con las unidades de campo integral en desarrollo.

Todas estas mejoras introducidas en GRIS, que sin duda redundarán en un instrumento mucho más versátil y potente que el actual para observaciones espectropolarimétricas solares de alta resolución espacial y sensibilidad magnética, constituyen la base del



instrumento IFS-S (*Integral Field Spectrograph – Slicer based*) para el telescopio EST que está actualmente en fase de diseño por parte del IAC conjuntamente con la Universidad de Coimbra.

Hasta la fecha, y como resultado de las investigaciones realizadas con las distintas versiones del instrumento (TIP, TIP-II, GRIS-rendija larga, GRIS-unidad de campo integral), se han publicado 128 artículos en revistas internacionales con revisor. De ellos, 50 (39 %) tienen un primer autor con filiación en una institución española (especialmente, IAC) y el resto (78 artículos, 61 %) lo tiene con filiación en una institución extranjera.

El progreso y el éxito de las diferentes versiones del instrumento no habría sido posible sin la gran cantidad de científicos que lo han utilizado para sus investigaciones (aportando numerosas sugerencias de mejoras) y sin la dedicación abnegada y eficiente del grupo de ingenieros que han participado en las diferentes fases. En el desarrollo de TIP-I y TIP-II participaron A. Cruz López, J. J. Díaz García, V. González Escalera, E. Hernández Suárez, E. Joven, R. López López, A. Manescau, E. Páez Mañá y V. Sánchez. En el desarrollo de GRIS contribuyeron E. Ballesteros, A. Calcines, J. J. Díaz García, E. Hernández Suárez, R. López López, E. Páez Mañá y M. Reyes. Para el desarrollo de las unidades de campo integral participaron (y algunos todavía participan) M. Barreto Cabrera, J. Bienes Pérez, A. Calcines, C. Domínguez-Tagle, F. González Pérez, F. Gracia Temich, A. Mato, R. López López, A. Pérez García, C. Quintero Noda, S. Regalado Olivares, C. Ruiz de Galarreta y J. J. Vaz Cedillo). Y para la introducción de los brazos espectrales adicionales en GRIS están contribuyendo J. Bienes Pérez, F. González Pérez, R. López López, J. Quintero Nehrkorn, C. Quintero Noda, A. Matta Gómez, S. Regalado Olivares, H. Rodríguez Delgado y C. Ruiz de Galarreta. El desarrollo del instrumento IFS-S está liderado por María Jesús Martínez González (IP del proyecto), con la colaboración de Sara Esteban.

MANUEL COLLADOS,  
físico solar del IAC, catedrático de la ULL  
y coordinador del proyecto EST.



# Los pequeños cuerpos del Sistema Solar en el infrarrojo

Los pequeños cuerpos del Sistema Solar incluyen asteroides, cometas, objetos transneptunianos (TNOs) y objetos transicionales (asteroides en órbitas cometarias, asteroides activos y Centauros). Son los remanentes o "ladrillos" que quedaron sin utilizar en el proceso de formación de los planetas y, por tanto, contienen los materiales menos modificados desde la formación de nuestro sistema solar, representando una oportunidad única para comprender los procesos que dieron lugar a su origen y evolución.

Impresión artística de un asteroide.

© NASA, ESA, CSA, N. Bartmann (ESA/Webb), Martin Kornmesser (ESA), Serge Brunier (ESO), Nick Risinger (Photopic Sky Survey)

Estos cuerpos no emiten luz propia, sino que reflejan la luz del Sol. No obstante, no la reflejan toda, una parte es absorbida y calienta sus capas superficiales. De este modo, dependiendo de la distancia a la que se encuentren del Sol, pueden alcanzar temperaturas que van desde los 35 K (-240°C), a los que está la superficie del TNO Sedna (uno de los objetos más lejanos, a una distancia de 84 UA), a los 1.025 K (750°C) que alcanza el asteroide cercano a la Tierra Phaethon cuando pasa a tan sólo 0,14 UA del Sol. De forma general, los objetos calientes emiten radiación electromagnética siguiendo aproximadamente la ley de Planck. Las estrellas, con temperaturas superficiales de miles de grados Kelvin, emiten mucha radiación en el espectro visible. Un ejemplo es el Sol, que tiene una temperatura superficial de ~5.500 K y presenta su pico de emisión a 0,5 micras (en la mitad del espectro visible por el ojo humano). Sin embargo, los pequeños cuerpos, mucho más fríos, y siguiendo la ley de Wien, tienen sus picos de emisión en el infrarrojo, a longitudes de onda de varias micras y, prácticamente, no emiten nada en el visible. Por ejemplo, Phaethon tendrá su máximo de emisión a 2,9 micras, y Sedna, a 83 micras. ¿Qué quiere decir esto? Que, si vamos a observar los pequeños cuerpos en el infrarrojo, dependiendo de a qué distancia estén del Sol, seremos capaces de verlos no por la luz solar que reflejen, sino por la radiación térmica que emitan.

Lo primero que se puede inferir del estudio de la emisión térmica de un pequeño cuerpo sin atmósfera, como es el caso de nuestros objetos de interés, es su tamaño. Efectivamente, la cantidad de emisión depende directamente de la temperatura y el área de la superficie que vemos del objeto, así que estudiando el brillo del objeto en diferentes regiones del espectro térmico podemos determinar su temperatura y tamaño. Combinando estos resultados con la determinación del brillo del objeto en el visible, donde lo que vemos es la luz que refleja del Sol, se determina otra propiedad física importante del objeto, el albedo (la fracción de luz solar que refleja), que tiene mucho que ver con su composición superficial.

Tamaño y albedo son propiedades físicas fundamentales para las que telescopios en el espacio han hecho un aporte fundamental. El caso paradigmático es el del telescopio de NASA WISE y su *survey* NEOWISE, que durante su vida útil permitió observar más de 150.000 pequeños cuerpos en cuatro bandas en el infrarrojo térmico y dio lugar a la mayor base de datos existente de tamaños y albedos de los mismos, lo que ha permitido determinar sus distribuciones de tamaños y las propiedades térmicas de familias y poblaciones. Además, este *survey* descubrió 34.000 nuevos objetos. Telescopios espaciales en el térmico (con imágenes alrededor de las 10 micras) son la mejor estrategia para descubrir asteroides ya que en esa región del espectro las estrellas se verán mucho más débiles que en el visible, mientras que los asteroides tienen su pico de emisión. Futuras misiones como NASA NEO-Surveyor

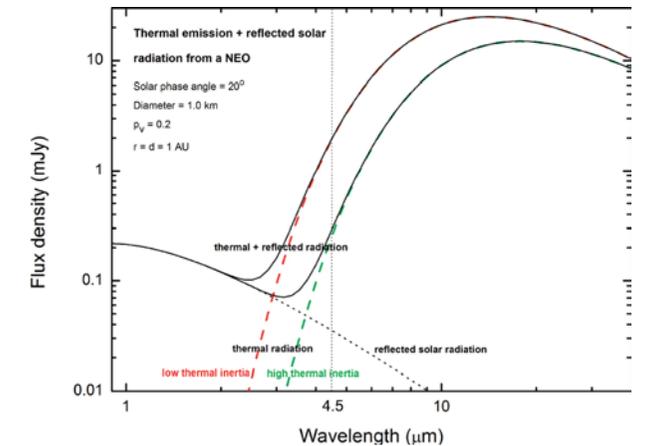


Figura 1. La figura muestra como una línea continua el flujo de energía que se puede observar en un NEO de 1 km de diámetro que esté a 1 UA del Sol visto desde una distancia de 1 UA. Este flujo es la combinación de la luz reflejada (la línea punteada) y la radiación térmica emitida (en rojo o en verde dependiendo de una propiedad fundamental del material superficial llamada "inercia térmica"). Como se puede ver, en la región entre 1 y 2,5 micras, la luz reflejada predomina, pero a partir de ahí y más allá de las 3 micras, el brillo del objeto será casi exclusivamente debido a la emisión térmica. © A.W. Harris, German Aerospace Center (DLR) Institute of Planetary Research. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. Finding Hazardous Asteroids Using Infrared and Visible Wavelength Telescopes. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25476>.

o ESA-NEOMIR buscarán asteroides cercanos a la Tierra utilizando imágenes a 10 micras. Otro telescopio espacial que ha resultado fundamental para el estudio de los TNOs ha sido el de la misión Herschel (ESA), que pudo observar estos objetos a longitudes de onda mucho mayores (hasta 240 micras) y, especialmente, en la región alrededor de las 70 micras, donde estos objetos tienen su pico de emisión. Herschel obtuvo datos de más de 500 TNOs y Centauros.

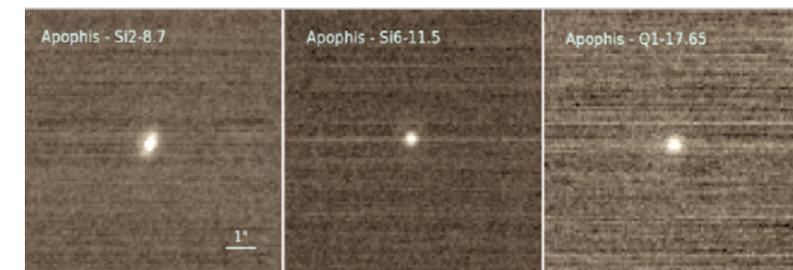


Figura 2. Imágenes del asteroide Apophis, uno de los objetos de mayor tamaño que se aproximan peligrosamente a la Tierra, obtenidas en tres regiones diferentes del infrarrojo térmico con el instrumento CanariCam en el GTC el 29 de enero de 2013. El asteroide se ve como un objeto puntual. Ajustando modelos de emisión térmica, se determinó que se trata de un objeto de entre 380 y 393 m de diámetro y que refleja entre un 24% y un 33% de la luz solar que recibe. También se obtuvo información sobre la rugosidad superficial y la inercia térmica del objeto. © Licandro et al. (2015, A&A 585, A10)

Adicionalmente, estudiar el espectro de la luz reflejada en el infrarrojo cercano (entre 1 y 5 micras) y el de la emisión térmica de estos objetos a longitudes de onda mayores, nos permite estudiar su composición superficial. En el infrarrojo cercano, los hielos (agua, dióxido y monóxido de carbono, metano, etc.) presentan bandas de absorción muy características, lo que ha permitido detectar su presencia y estudiar su abundancia en asteroides, cometas, Centauros y objetos transneptunianos (TNOs). Los datos obtenidos de los espectros de los TNOs Makemake, cuya superficie está cubierta por abundante hielo de metano, y Haumea, cuya superficie es una capa de hielo de agua, muestran un ejemplo del potencial de la espectroscopía en el infrarrojo cercano.

No sólo los hielos tienen bandas de absorción características, también las tienen los compuestos orgánicos complejos (largas cadenas o anillos de carbono que se forman por la irradiación de hielos como el  $\text{CH}_4$  y el  $\text{CO}_2$ ) y los silicatos hidratados (silicatos que se “oxidán” por la interacción con agua en estado líquido), que suelen presentar bandas de absorción entre 2,7 y 3,5 micras. Gracias a la obtención de espectros en esta región hemos podido probar que hay asteroides, como Themis y Cybele, que contienen orgánicos complejos (tanto adiabáticos como alifáticos) y una finísima capa de agua en su superficie, algo impensable hasta 2010. Agua y orgánicos complejos son elementos absolutamente imprescindibles para la formación y desarrollo de la vida. Su detección en asteroides, cuerpos que han chocado con la Tierra desde su misma formación, tiene importantes implicaciones para el estudio del origen de la vida en nuestro planeta.

Hasta ahora, salvo por pequeños telescopios en el espacio, como el de la misión japonesa AKARI, estos espectros se han obtenido desde tierra o desde el observatorio SOFIA, instalado en un Boeing 747. Con la puesta en funcionamiento del telescopio James Webb se está produciendo una revolución en el estudio de la composición de los pequeños cuerpos, muy especialmente de los más alejados, los TNOs y Centauros.

La presencia de silicatos en forma de polvo fino en suspensión puede estudiarse en los espectros de emisión en el térmico, a más de 5 micras, donde estos granos de polvo producen

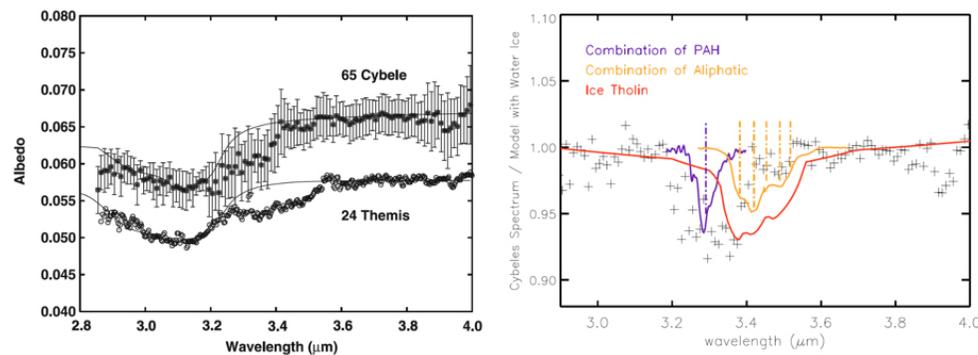


Figura 5. A la izquierda, los espectros de 65 Cybele y 24 Themis obtenidos con el telescopio IRTF (Mauna Kea, Hawaii) con un modelo superpuesto del espectro correspondiente a una finísima capa de hielo de agua. Se puede observar que, entre 3,2 y 3,6 micras, hay una banda de absorción adicional que, como se muestra en la figura de la derecha, se debe a la presencia de materiales orgánicos complejos. © Licandro et al. (2011, A&A 525, A34)

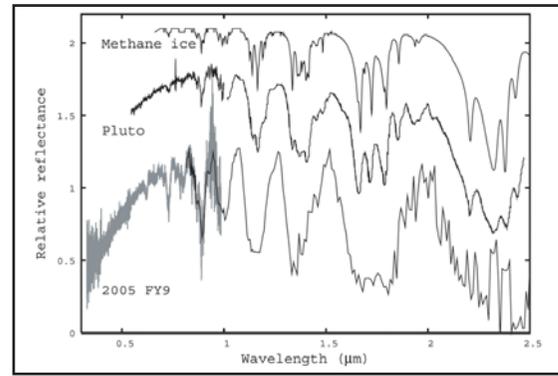


Figura 3. Espectro visible (gris) e infrarrojo cercano (negro) del gran TNO Makemake (2005 FY9) obtenido el 1 de agosto de 2005 con los telescopios WHT y TNG en el ORM. El espectro se muestra junto con el espectro de Plutón (Grundy & Fink 1996) y el espectro de laboratorio del hielo de metano. Se puede ver que Makemake, al igual que Plutón, tiene las bandas de absorción típicas del  $\text{CH}_4$ , lo que demuestra que tienen abundante cantidad de hielo de metano siendo, junto con Eris, los primeros TNOs que mostraron ser muy similares a lo que antes fuera considerado el noveno planeta. © Licandro et al. (2006, A&A 445, L35-38)

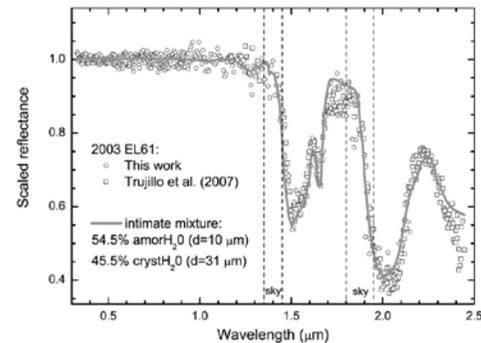


Figura 4. Espectro visible e infrarrojo del TNO Haumea (2003 EL61) obtenido el 26 de febrero de 2006 con los telescopios WHT (visible) y TNG (infrarrojo), superpuesto con el espectro obtenido en el infrarrojo por Trujillo et al. (2007) donde se pueden ver las profundas bandas de absorción a 1,5 y 2,0 micras, que se deben al hielo de agua. La línea continua se corresponde con el ajuste del modelo que muestra que la superficie de Haumea está cubierta por una gruesa capa de hielo de agua casi pura, parte en estado amorfo (“nieve”) y parte cristalino (“hielo”). © Pinilla-Alonso et al. (2009, A&A 496, 547-556)

un exceso de emisión en amplias bandas, como se pudo observar en el asteroide Cybele.

En esta región del espectro, los estudios realizados con Spitzer fueron pioneros y tendrán continuidad con el JWST, telescopio que ha abierto una nueva y fantástica ventana para el estudio de nuestro sistema solar.

Finalmente, las imágenes en el infrarrojo sirven para caracterizar el polvo en las comas y colas de los cometas, ya sea mediante imágenes o espectros. Uno de los hitos más interesantes alcanzados con el telescopio Carlos Sánchez

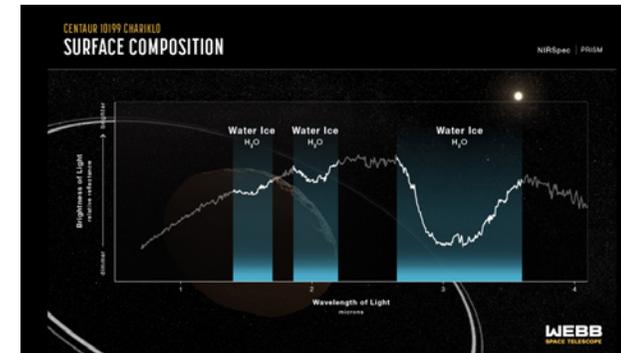


Figura 6. Espectro obtenido con el JWST mediante observaciones hechas con NIRSpec en tiempo garantizado, de las que el Grupo de Sistema Solar del IAC forma parte. Se pueden ver las bandas de hielo de agua, muy especialmente la que se encuentra a 3,1 micras, que presenta un pico alrededor del mínimo (pico de Fresnel), indicando la presencia de agua cristalina. © Figura modificada de NASA, ESA, CSA, Leah Hustak (STScI). Science: Noemí Pinilla-Alonso (FSI/UCF), Ian Wong (STScI), Javier Licandro (IAC)

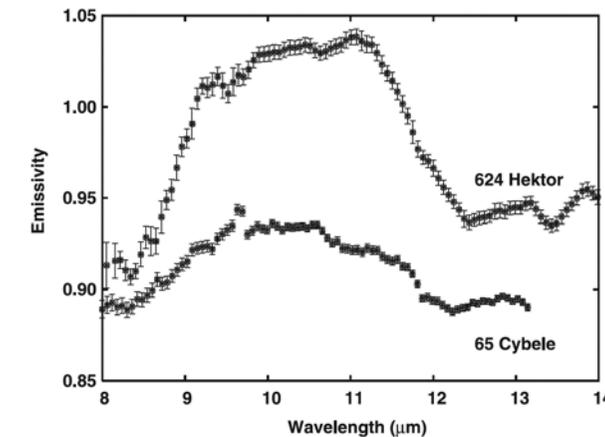


Figura 7. Espectros de emisión de los asteroides 65 Cybele y 624 Hektor obtenidos con el espectrógrafo del telescopio espacial Spitzer de NASA. Se puede ver la amplia banda de emisión entre 8 y 12 micras de estos objetos, que está producida por una capa de polvo muy fino en suspensión. Esta capa de polvo podría haberse formado en un proceso de sublimación del hielo de agua que ocurrió miles o millones de años atrás, como el que se observa en los cometas. © Licandro et al. (2011, A&A 525, A34)

con su cámara infrarroja CAIN fue la determinación del período de rotación del cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp). Durante todo el mes de abril de 1996, cuando el cometa estaba muy cerca del Sol, el objeto era tan brillante que pudo ser observado durante el día. El seguimiento de las estructuras en forma de jets espirales permitió determinar que el núcleo del cometa rotaba con un período de 11,35 horas.

JAVIER LICANDRO Y JULIA DE LEÓN,  
astrofísicos del IAC

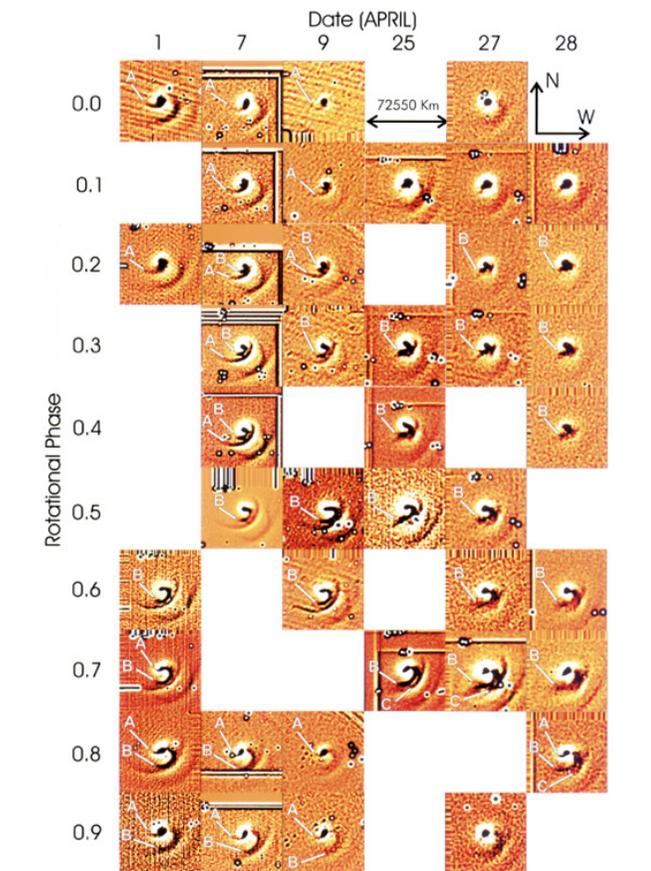


Figura 8. Imágenes del cometa Hale-Bopp obtenidas con el TCS, en el Observatorio del Teide, en diferentes días durante el mes de abril de 1996. Mediante el procesado de estas imágenes utilizando un filtro Laplaciano se destacan las estructuras de la coma cercana al núcleo del cometa. Se pueden observar jets de polvo en forma espiral que se forman por la emisión de polvo desde al menos dos zonas restringidas del núcleo cometario. Se puede ver además cómo estos rotan con una periodicidad de 11,35 horas correspondientes a la rotación del núcleo del cometa. Las imágenes están ordenadas por día y fase rotacional, de modo que se puede observar la misma configuración del jet vista en días diferentes. © Licandro et al. (1999, ApJ 501, L221-L225)

# La esfera de vapor y la ventana infrarroja

El principal contribuyente a la extinción de la luz infrarroja es el vapor de agua. Este gas extremadamente variable presenta un complejo perfil de absorción en todo el rango infrarrojo, con importantes ventanas transparentes intercaladas, lo que ha permitido el desarrollo de la astronomía en estas longitudes de onda desde la Tierra. No obstante, incluso en esas ventanas de transparencia, la observación solo es posible en condiciones de muy baja concentración de vapor, lo que limita mucho el número de sitios válidos. Tras treinta años de investigación intensiva en la calidad del cielo de los Observatorios de Canarias, hoy sabemos que disfrutamos de unas condiciones excepcionales también en infrarrojo. Las características particulares de la troposfera en las Islas propician que la concentración de vapor de agua en sus observatorios sea menor que la que les correspondería atendiendo exclusivamente a su altura. Esta excelencia queda reflejada en la abundancia de instrumentación y resultados científicos obtenidos en este rango.

## ATMÓS (ατμός) = VAPOR

La capa de gases que nos mantiene con vida en la Tierra, la atmósfera, es, etimológicamente, la esfera de vapor. También es el último obstáculo que encuentra la luz tras su larguísimo viaje hasta nuestros telescopios. Los fotones que llegan son los supervivientes de una yincana. Al atravesar

la atmósfera, la luz sufre desvíos (refracción), emborronamiento por cambios ultrarrápidos y aleatorios en las condiciones locales de refracción inducidos por la turbulencia y atenuación (reducción de la intensidad), llamada habitualmente extinción. Este último efecto es especialmente grave: los fotones extinguidos se pierden de forma definitiva. Si el objeto de estudio es débil y la extinción es grande, puede llegar a desaparecer en medio de la luz de fondo, porque el cielo nocturno, hagamos lo que hagamos, de forma natural, brilla. El efecto se agrava si, encima, añadimos luz artificial, como ocurre cuando existe contaminación lumínica.

Los fotones se pierden al chocar con partículas de polvo, aerosoles o las propias moléculas que constituyen la atmósfera. En el infrarrojo, además, serán absorbidos por algunas de esas mismas moléculas, a las que ceden por completo su energía. En un modelo simple, podemos visualizar las moléculas de gas como esferas conectadas por resortes ideales. Si la energía del fotón coincide exactamente con alguna de las frecuencias de resonancia de la molécula (aquéllas en las que, por su geometría y relación de masas, tiende a oscilar con máxima amplitud de manera no amortiguada), ese fotón será absorbido. Es decir, si tiene una longitud de onda muy concreta, transmitirá toda su energía a la molécula, que quedará vibrando, estirando y comprimiendo los resortes, o bien rotando en torno a sus ejes de simetría. Mientras tanto, el fotón habrá desaparecido con toda la información que portaba.

Hasta 42 gases entran en este juego: dióxido de carbono, ozono, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, metano, oxígeno, dióxido de azufre y, sobre todo, vapor de agua, son los más importantes. Recorriendo el espectro infrarrojo desde las longitudes de onda más próximas al rango visible, en torno a 0,7 micras,

hasta las más alejadas, de centenares de micras, e incluso más allá, en el submilimétrico o microondas (con longitudes de onda ya de centímetros), nos encontraremos con franjas y franjas de rangos espectrales en los que la absorción es debida, casi en exclusiva, a la molécula de vapor de agua. Una molécula en la que dos núcleos de hidrógeno se enlazan con un oxígeno formando un ángulo de unos 105°, de forma que aumentan mucho las combinaciones de vibración y rotación que permiten absorber fotones de distintas energías. La atmósfera llega a volverse completamente opaca en vastas áreas del espectro. La importancia es tal que la astronomía ha definido sus bandas de observación en función de las ventanas transparentes que permite este gas.

## EL PLANETA AZUL

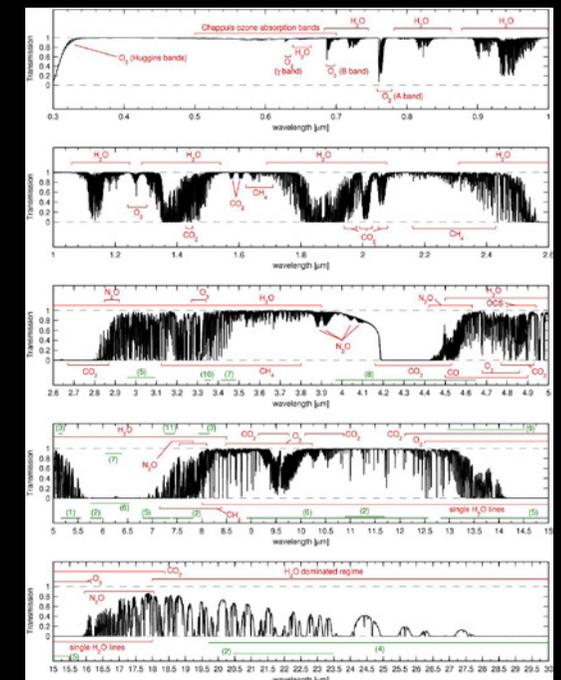
Es, precisamente, su fuerte capacidad de absorber radiación infrarroja la que hace del vapor de agua un potente gas de efecto invernadero. Lo que, por un lado, permite que la Tierra no sea una desolada bola de hielo, por otro, convierte a su atmósfera en una pantalla semiopaca para la observación astronómica en amplios rangos del espectro, sin que se requiera para ello, además, de grandes concentraciones. Aunque hay alrededor de  $13 \times 10^{15}$  kg (13 exagramos) de vapor de agua en la atmósfera, no podemos considerar que sea una cifra tan enorme, habida cuenta de que representa apenas el 0,001% (10 partes por millón) del total de agua del Planeta. Una cantidad que, a su vez, tampoco es grande. A pesar de vivir en el planeta azul, toda el agua de la Tierra (océanos, casquetes polares, glaciares, ríos, lagos, acuíferos, el agua de los seres vivos, el vapor...) cabría en una gota gigante de sólo 1.400 km de diámetro (la distancia entre Tenerife y Sevilla). En total, el vapor de agua supone aproximadamente el 0,25% de todos los gases de la atmósfera, aunque con grandes diferencias geográficas y temporales que lo pueden hacer variar localmente entre 0 y 4%.

En efecto, el vapor de agua no es solo el mayor contribuyente de la extinción de la luz en el infrarrojo. Además, es, con mucha diferencia, el más variable y el más heterogéneamente distribuido de todos los gases atmosféricos. Su comportamiento termodinámico hace que la concentración tienda a ser máxima en el ecuador, mínima en los polos y más escaso según se aumenta la altura (la mitad del vapor se concentra en el primer kilómetro y medio; a la estratosfera no llega ni una centésima parte), con importantes alteraciones adicionales inducidas por el complejo modelo general de circulación atmosférica. Por otro lado, temporalmente puede variar desde escalas de minutos hasta ciclos estacionales.

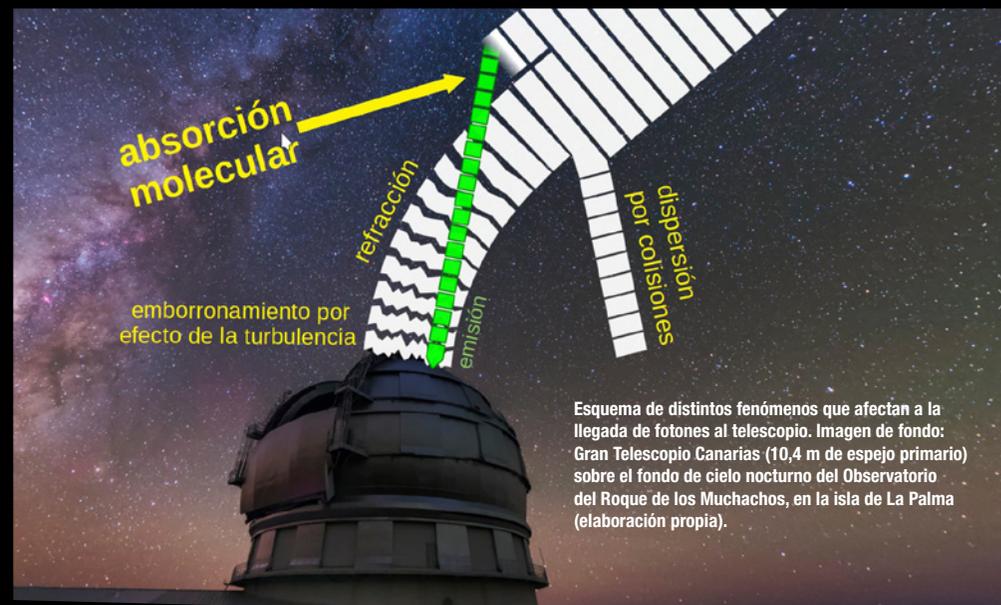
## VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE: MENOS ES MÁS

Buscar y caracterizar los sitios más oscuros, con las atmósferas más transparentes, limpias y estables es el objeto de los estudios de calidad astronómica del cielo. Fruto de años de investigación, hoy sabemos que apenas un puñado de privilegiados rincones del Globo cumplen con esas estrictas características. Las cumbres de Canarias, con sus dos relevantes observatorios astronómicos, el del Teide (Tenerife) y el del Roque de los Muchachos (La Palma), están entre ellos. Poniendo el foco en la astronomía infrarroja, la caracterización de la concentración del vapor de agua es la clave. Cuanto menos vapor, mejor.

Las mediciones deben hacerse integrando todo el vapor de agua presente en una columna imaginaria que abarque desde el suelo del observatorio hasta el límite de la atmósfera. Independientemente de la técnica que se use, la manera de estimar la cantidad de vapor es calculando su equivalente en agua líquida. Por conveniencia, se toma un área de 1 m<sup>2</sup> como la base de la columna, de modo que lo que se mide es directamente la altura, en milímetros, que alcanzaría todo el vapor presente si precipitara en forma líquida en el fondo de un gran vaso de igual base. Hablamos entonces de vapor de agua precipitable. A nivel global, la altura promedio son unos 25 mm, pero para considerar



Espectro de transmisión del cielo (1 es total transparencia; 0 es total opacidad) en un sitio de calidad astronómica, generado con un modelo de transferencia radiativa en un rango de longitudes de onda que van desde el ultravioleta hasta el infrarrojo medio. Reproducido desde Smette et al, A&A 576, A77 (2015). En rojo están las moléculas principales responsables de absorción de fotones. En verde se marcan zonas donde, además, se encuentran contribuciones menores de otras moléculas (ver detalles en la referencia). El vapor de agua (H<sub>2</sub>O) aparece en prácticamente todas las longitudes de onda del infrarrojo. La "profundidad" (proximidad a cero) que alcanzan las líneas bajo influencia del vapor se reduce en condiciones de baja concentración.



Esquema de distintos fenómenos que afectan a la llegada de fotones al telescopio. Imagen de fondo: Gran Telescopio Canarias (10,4 m de espejo primario) sobre el fondo de cielo nocturno del Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma (elaboración propia).

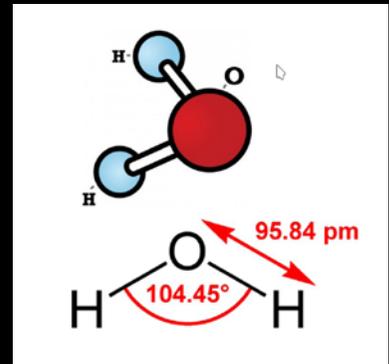


Representación de toda el agua presente en la Tierra concentrada en una esfera líquida de unos 1.400 km de diámetro. © IAC

condiciones excelentes de observación en infrarrojo no puede llegar a 3 mm. Las condiciones óptimas empiezan por debajo de 2 mm.

Tras casi tres décadas de mediciones de vapor de agua en los Observatorios de Canarias, empleando radiómetros, fotómetros, radiosondeos y la técnica de sensado de las refracciones que sufren las señales de los sistemas satelitales de posicionamiento y navegación global, GNSS (GPS, Galileo, etc.), sabemos que las condiciones óptimas o excelentes se alcanzan en más de un 45% del tiempo. Ciertas particularidades de la troposfera en Canarias hacen que haya menos vapor del que correspondería atendiendo simplemente a la altura. Nuestra pequeña parcela dentro la gran esfera de vapor tiene vistas privilegiadas al universo infrarrojo.

El IAC, por medio de su equipo de Calidad astronómica del Cielo, mantiene monitores de vapor de agua precipitable en tiempo real y un sistema de predicción numérica actualizado cada seis horas, cruciales para poder anticipar las mejores condiciones, de modo que se puedan priorizar los programas más propicios. Son numerosos e importantes los resultados científicos a partir de datos infrarrojos obtenidos en nuestros observatorios. Incluso con instrumentos que se han adentrado en longitudes de onda del infrarrojo medio, como es el caso de CanariCam, el instrumento del Gran Telescopio Canarias que llegaba a 20 micras.



Dos representaciones de la estructura de una molécula de vapor de agua (H<sub>2</sub>O). El oxígeno (O) es 16 veces más pesado que los hidrógenos (H). © Wikipedia

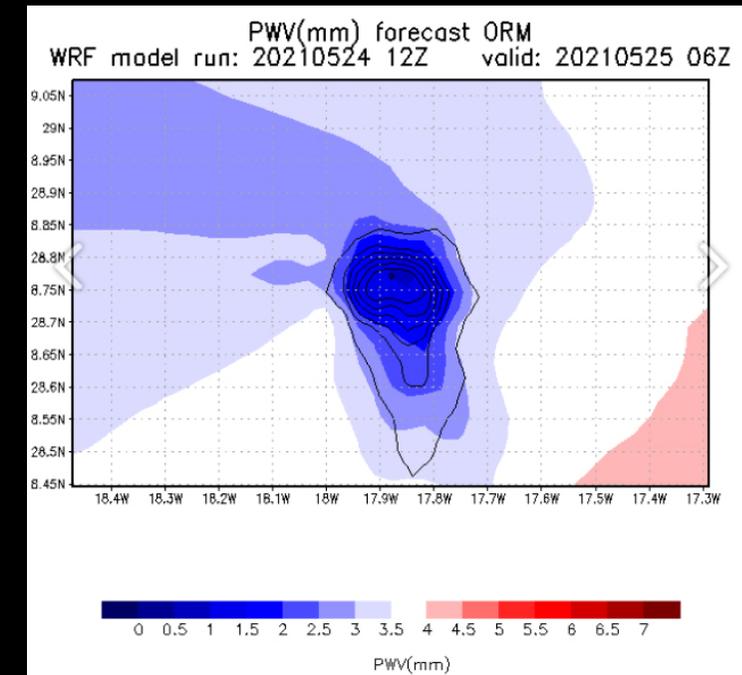
JULIO A. CASTRO-ALMAZÁN  
astrónomo del IAC, experto en calidad del cielo



Observatorio del Teide © Daniel López/IAC



Observatorio del Roque de los Muchachos © Daniel López/IAC



Distribución de vapor de agua precipitable (PWV) sobre la superficie de la isla de La Palma, en un momento dado. Se aprecia la disminución pronunciada según aumenta la altura. En el nivel del Observatorio, se alcanzan valores inferiores a 2 mm. © Salida del sistema de predicción ForO del IAC

# Colector de flujo infrarrojo

## De prototipo de pruebas a telescopio permanente

En un artículo sobre astronomía infrarroja en Tenerife publicado en 1978, en el *Journal of the British Astronomical Association*, se describía la historia, construcción y operación del prototipo de un nuevo telescopio británico de 3,8 m, el UKIRT, que entraría en operación en Hawái. Ese prototipo era un reflector de 1,5 m, el Infrared Flux Collector (Colector de flujo infrarrojo), renombrado posteriormente Telescopio Carlos Sánchez (TCS) y operativo en el Observatorio del Teide desde 1972.

El autor del artículo, el astrónomo **Anthony W. Jones**, del Imperial College, iniciaba el texto recordando la figura de **Charles Piazzi Smyth**, “aventurero y Astrónomo Real de Escocia”, y uno de sus experimentos en Montaña Guajara, cerca del pico del Teide, el que realizó la noche del 15 de agosto de 1856. “Desde que William Herschel descubriera la radiación infrarroja procedente del Sol -advertía Jones-, los astrónomos habían intentado en vano detectar una radiación similar de la Luna. Si, como pensaba Smyth, el fallo se debía a ‘la dispersión del calor en las zonas altas de la atmósfera’, los resultados serían mejores desde una montaña tan alta como el Teide”. Como en aquella época las emulsiones fotográficas no eran sensibles a longitudes de onda mayores a una micra y era imposible fotografiar la luz infrarroja de la Luna, Smyth probó con un “termomultiplicador” proporcionado por el empresario y científico aficionado John Peter Gassiot.

“A 2.300 m de altitud apuntó el termomultiplicador a la Luna -relataba Jones- y, durante la siguiente hora y media, realizó unas 200 mediciones de su radiación infrarroja. Tras haber calibrado su instrumento tomando como referencia una vela, llegó a la conclusión de que había detectado

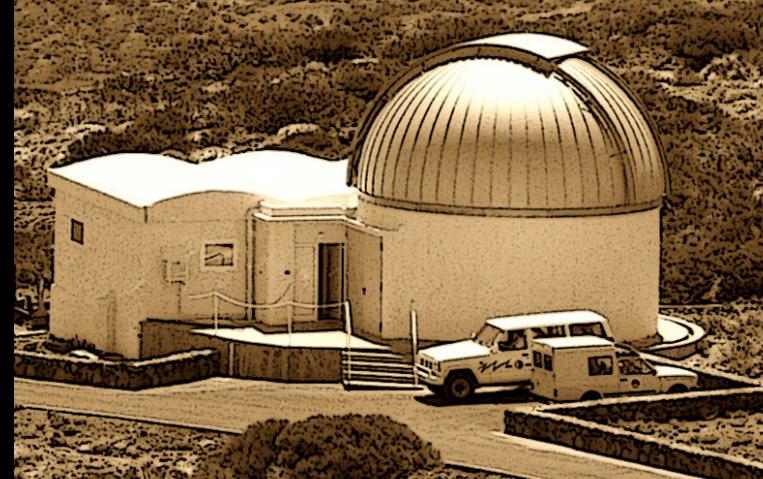


Charles Piazzi Smyth, en Montaña Guajara, cerca del pico del Teide, en 1856. © Archivo ROE

calor de la Luna. No había duda entonces de que las observaciones realizadas casi a nivel de mar habían sido erróneas. Incluso allí, en el Teide, gran parte de la radiación infrarroja se había filtrado a través de la atmósfera, y lo que quedaba afectaba ligeramente al rudimentario termomultiplicador”. Piazzi Smyth también comprobó, por otro lado, la hipótesis de Isaac Newton de que las cimas de las montañas, con su “aire más sereno y calmado”, serían lugares ideales para instalar observatorios astronómicos.

### ASTRONOMÍA INFRARROJA EN LOS SESENTA

Jones continuaba su historia en la década de los sesenta, cuando los astrónomos se interesaron de nuevo por la zona infrarroja del espectro, entre 0,8 y 1.000 micras. “Los avances en la ciencia y la tecnología -explicaba- ofrecían ya soluciones para los problemas que se le plantearon a Piazzi Smyth y a sus contemporáneos tantos años atrás. Concretamente, la investigación militar había producido detectores muchos más sensibles que su termomultiplicador. Los astrónomos americanos estaban realizando sorprendentes descubrimientos en el cielo infrarrojo y, en 1967, un grupo de científicos británicos del Imperial College encabezado por el Profesor **Jim Ring**, presentaron la propuesta de un “colector de flujo” infrarrojo radicalmente nuevo para explotar las ‘ventanas’ de la atmósfera que permiten el paso de los rayos infrarrojos. En lugar de formar una imagen definida a través del plano focal, como pasaría con un telescopio



Telescopio Carlos Sánchez (TCS). © Miguel Briganty (IAC)

convencional, todos los rayos de un haz muy estrecho se concentrarían en el foco de un eje óptico donde se podrían ver por un detector infrarrojo de quizás un milímetro de ancho. Según estos científicos, no tenía sentido formar una imagen más extensa si no se podía fotografiar y, en cualquier caso, era probablemente más débil que el fondo celeste. En este caso, el instrumento sería una especie de cruce entre un telescopio óptico convencional y un radiotelescopio. Se podrían elaborar mapas de objetos extensos o campos estelares escaneando el rayo a través de ellos.”

Todo esto se traducía en que los grandes telescopios infrarrojos se podrían construir con muy bajo coste, diez veces menor que el de un telescopio óptico del mismo tamaño. El diseño de la óptica no tendría por qué ser muy preciso. El espejo primario podría ser más delgado y ligero, así como la estructura de soporte. De modo que se propuso un prototipo de 1,5 m de diámetro, que serviría de pruebas en distintos emplazamientos y al que seguiría una instalación permanente de 3 m o mayor. Sin embargo, los británicos se dieron cuenta de lo beneficioso que sería montar el prototipo de forma permanente en un sitio concreto para ir avanzando en astronomía infrarroja, como estaban haciendo los americanos, y tuvieron que rediseñar el telescopio.

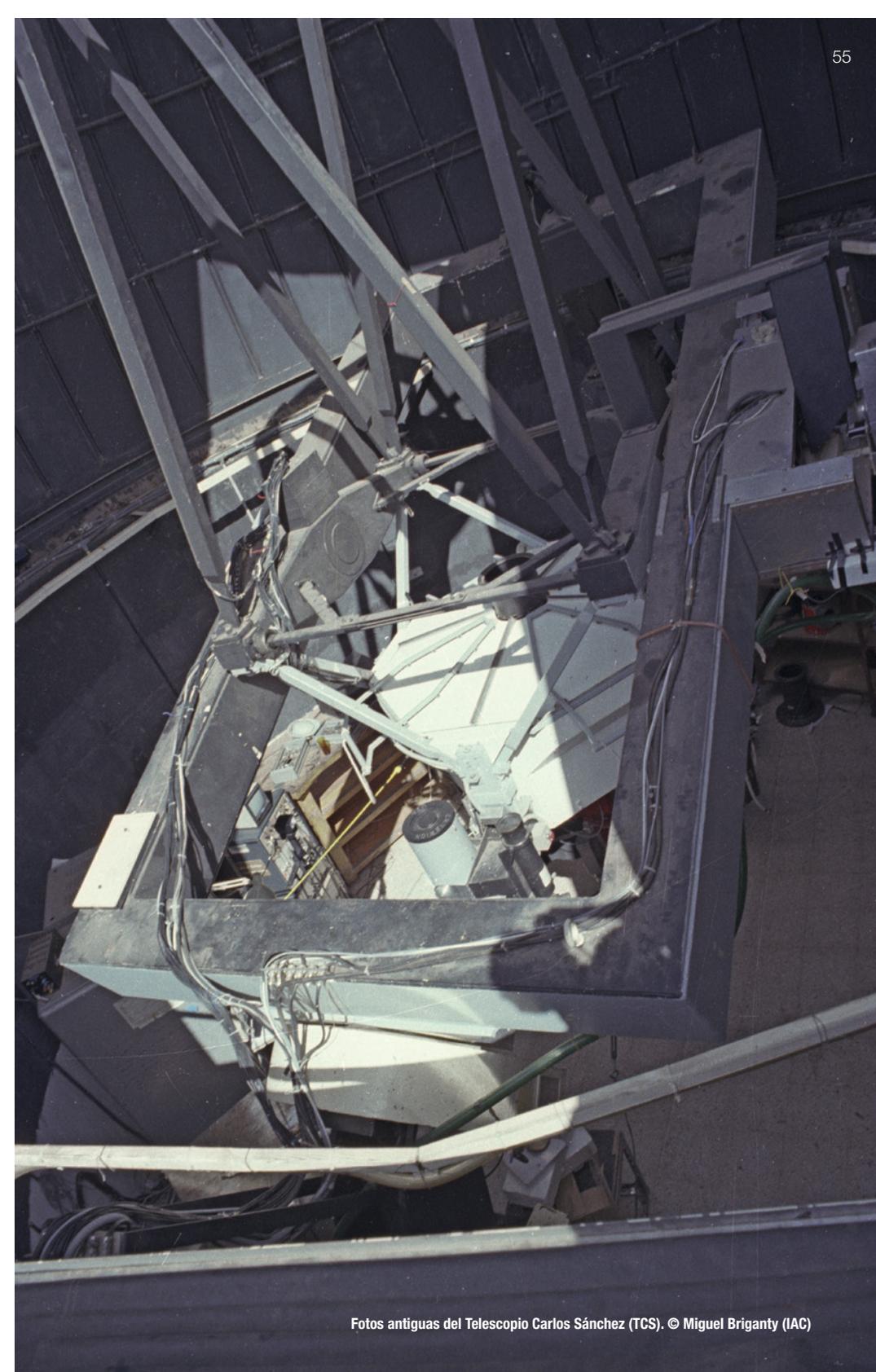
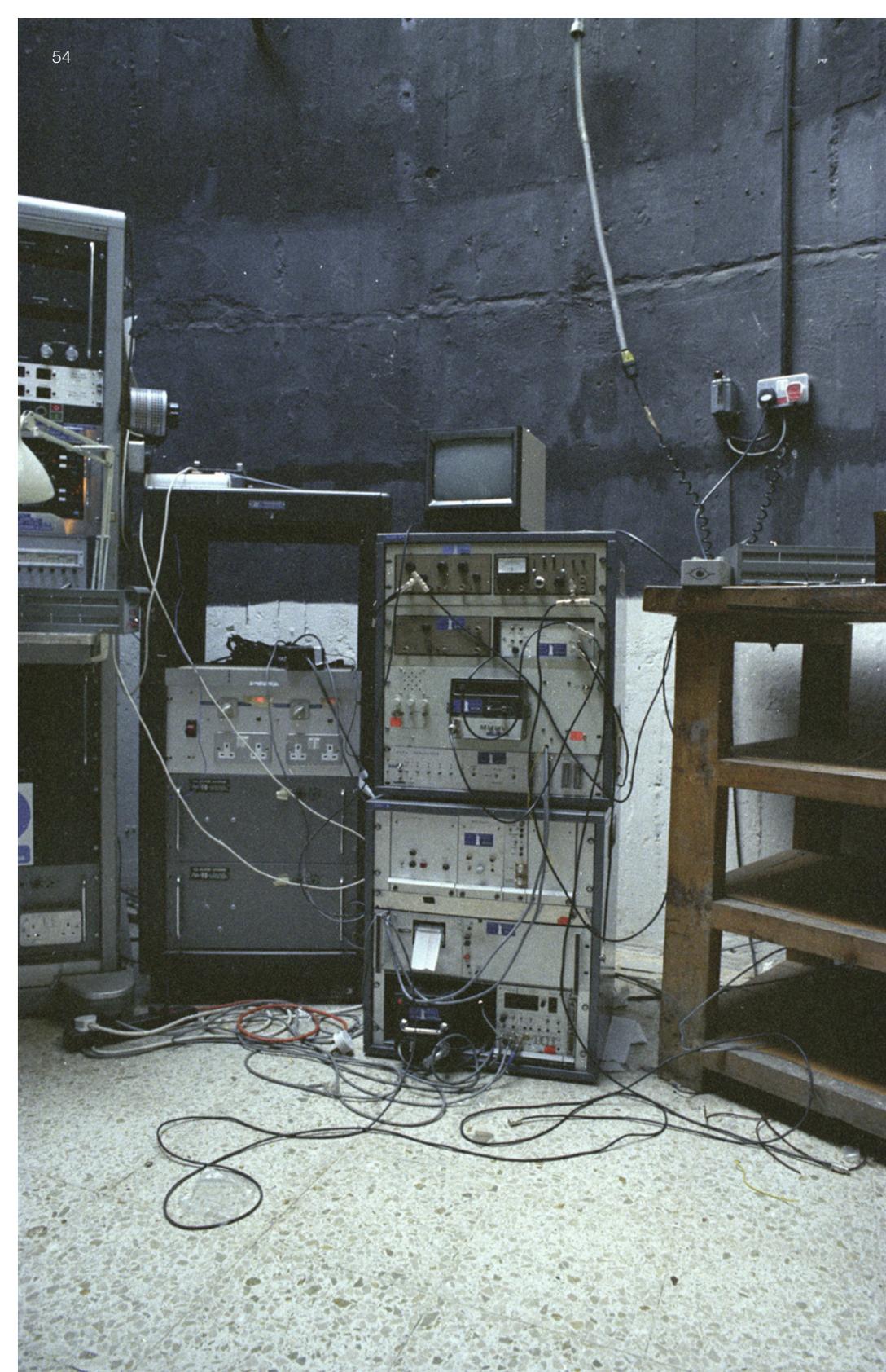
“El ingeniero jefe del proyecto, **John Long**, nunca había diseñado un telescopio -subrayaba Jones-, con lo que propuso ideas nuevas ante un problema nuevo. El espejo era inusualmente delgado para su tamaño, solo 127 mm, y estaba sujeto a su celda mediante un sistema de 12 ballestas. El sistema óptico era el mayor Dall-Kirkham del mundo, un espejo primario elíptico con

un secundario esférico en configuración Cassegrain. La montura secundaria se sujetaba mediante cuatro vigas de acero inoxidable muy finas, de solo medio milímetro de grosor, y bañados en oro para reducir la emisión infrarroja hacia el interior del telescopio. Independientemente de la elevación a la que se apuntase el telescopio, el movimiento del espejo primario en su celda quedaba compensado por la flexibilidad de la montura del secundario. Con un primario f/3, el tubo podía construirse muy bajo, ahorrando así en el tamaño de la cúpula y del edificio del observatorio. Se encargó una viga f/18-2 para el foco Coudé, además de una viga f/13-8 en el foco Cassegrain habitual. Con estas modificaciones, el colector de flujo resultante tendría una resolución de dos segundos de arco, suficiente para el uso infrarrojo.”

“Una vez completado el diseño -proseguía Jones-, el trabajo estructural en el tubo y en el soporte del montaje ecuatorial, se contrató al Departamento de Proyectos Espaciales de Dunford Hadfields de Sheffield, y sir Howard Grubb Parsons y Cia. se encargaron de la óptica, previa garantía de que trabajar con tolerancias tan bajas no ensombrecería su bien merecida reputación.”

### EMPLAZAMIENTO EN TENERIFE

Con respecto al emplazamiento ideal para ese colector de flujo infrarrojo, se tenía claro que debía estar a gran altitud para escapar a los efectos del vapor de agua, que desenfoca el cielo infrarrojo, y asegurar de este modo un buen *seeing*, así como una alta proporción de cielos despejados. Se estudiaron localizaciones en Pic du Midi, en Francia, Sierra Nevada, en el sur de España, y dos emplazamientos en los Alpes suizos, pero finalmente se eligieron las laderas del Teide, en Tenerife, muy cerca del observatorio levantado por Piazzi Smyth más de un siglo antes. “El lugar escogido -señalaba Jones- fue Izaña, cerca del borde de la antigua caldera que rodea el pico del Teide por tres lados. Aquí, a una altitud de más de 2.300 m y, aproximadamente, a 1.000 m o 1.300 m por encima del nivel de las nubes, la Universidad local de La Laguna ya había establecido un observatorio para el estudio de la Luz Zodiacal y había construido un telescopio de torre solar. Como informara Piazzi Smyth, las condiciones astronómicas eran ideales: los datos meteorológicos recogidos a lo largo de 20 años demostraban que la extinción visual media en el cénit era de 0,2 magnitudes, y que la proporción de noches útiles variaba entre el 46% en noviembre y el 95% en junio.” Tras el interés por instalar en Canarias un observatorio permanente con motivo del eclipse de



Sol de 1959, visible como total en las Islas, científicos españoles liderados por el astrofísico **Francisco Sánchez** habían medido las condiciones astronómicas del cielo de Canarias para la moderna astronomía y, convencidos de su excelente calidad, promovieron, dentro y fuera de nuestras fronteras, este recurso natural, poniéndolo en valor.

Las negociaciones en torno al emplazamiento para el prototipo del colector infrarrojo fueron rápidas y en 1970 se firmó un acuerdo formal entre la Universidad de La Laguna (del que dependía el Observatorio del Teide inicialmente) y el Imperial College, de la Universidad de Londres, por el cual se permitía al último instalar telescopios en Izaña. A cambio, la ULL tendría derecho al 20% del tiempo de observación, como se había hecho con el telescopio de la Universidad de Burdeos instalado en 1964. Estas contrapartidas se mantendrían en acuerdos posteriores con otras instituciones y países que quisieran instalar sus telescopios en los Observatorios de Canarias.

Tras elegir el emplazamiento e iniciada la construcción del telescopio, el debate se centró en cómo construir un fotómetro para observar objetos infrarrojos y el resto de la instrumentación requerida. El Royal Observatory de Edimburgo diseñó una unidad de control para orientar el telescopio hacia posiciones determinadas y a intervalos de tiempo regulares. La cúpula fue construida en la Ash Manufacturing Company de Illinois (EEUU) y era la mayor que había fabricado hasta entonces. Por razones económicas, solo tenía 7,3 m de diámetro, lo suficiente para cubrir el telescopio, pero debía tener una abertura de 2,3 m de ancho y eso planteó problemas estructurales. “Poco después de haberse colocado la cúpula -contaba Jones- empezó a abombarse por los lados y a producir interferencias. Luego se presentaron problemas más serios (se filtraba agua, se caían las contraventanas, etc.) y Ash, que observaba con creciente ansiedad desde el otro lado del Atlántico, envió una pieza de repuesto nueva rediseñada y reforzada que fue instalada en 1976.”

En 1971 habían comenzado las obras de acondicionamiento del lugar y el colector de flujo vio su “primera luz” en abril de 1972. Al principio, fue un telescopio utilizado por astrónomos británicos y por muchos otros en proyectos de colaboración, incluidos con astrónomos aficionados. En 1982, el SERC (Science and Engineering Research Council), del Reino Unido, cedió a España este telescopio. Desde 1987 hasta la actualidad, tanto el telescopio como su instrumentación se han estado renovando continuamente.

## UNA NOCHE DE OBSERVACIÓN EN EL COLECTOR DE FLUJO A FINALES DE LOS SETENTA

Descripción de A.W. Jones, testigo directo (hizo su tesis doctoral con este telescopio) sobre el modo de trabajo en el Colector de flujo del Observatorio del Teide a finales de la década de los setenta.

*“... El telescopio de 1,5 m en la ladera sur del emplazamiento protegida de los vientos, tiene ahora una única sala, con una cocina, una sala de descanso, un baño, un laboratorio, un almacén y un ordenador Data General Nova 2/10. Este ordenador se puede emplear para supervisar las observaciones y procesarlas on line, lo que permite a los observadores ver los resultados casi inmediatamente. También sirve para entretenerse cuando la noche está nublada.*”

*Un astrónomo aficionado que entre en la cúpula en una noche ajetreada puede sentirse como en casa. No hay ayudantes permanentes de noche en este telescopio, los observadores hacen ellos mismos todo el trabajo, incluso girar el telescopio mediante unas manivelas estratégicamente situadas. Entre la parafernalia profesional de teletipos y osciloscopios encontrará (probablemente faltarían) linternas rojas, gorros de lana y pies fríos. Podrá ver el interior de la cúpula de acero embadurnado con pintura negra para evitar los reflejos de la Luna. Se encontrará a uno de los observadores (probablemente un/a estudiante) retorcido en una postura difícil para llegar al mando del telescopio, el otro (probablemente su supervisor/a) bebiendo litros de café sin quitar el ojo de la registradora. Y, al calor de la cocina, se encontrará al otro turno tomando tostadas, escuchando la BBC y leyendo libros de bolsillo. Estas son las condiciones en que, entre medio inglés y medio español, se desarrolla la astronomía infrarroja en Tenerife.”*

ANTHONY W. JONES

REFERENCIA:  
-Jones, T. (1978). “El Teide and the flux collector. Infrared astronomy on Tenerife”. Journal of the British Astronomical Association, 88, 257-266.

## GRANDES TELESCOPIOS TERRESTRES INFRARROJOS



El telescopio infrarrojo UKIRT, de 3,8 m, en el Observatorio de Mauna Kea, en Hawái  
© Jason Chu/IFA, Hawái

### EL TELESCOPIO INFRARROJO DEL REINO UNIDO (UKIRT)

El Telescopio Infrarrojo del Reino Unido (UKIRT) es un telescopio reflector infrarrojo con un espejo primario de 3,8 m (150 pulgadas) y que cubre un rango de longitud de onda entre 1 y 30 micras, lo que le convierte en uno de los telescopios infrarrojos más grandes del mundo. Construido entre 1975 y 1978, se halla ubicado y operativo en el Observatorio de Mauna Kea, en Hawái, desde 1979, después de que su prototipo, el actual telescopio Carlos Sánchez (TCS), funcionara con éxito desde comienzos de los setenta en el Observatorio del Teide.

Inicialmente, era propiedad del Consejo de Instalaciones Científicas y Tecnológicas del Reino Unido hasta su transferencia en 2014 a la Universidad de Hawái en Hilo. Actualmente, UKIRT opera bajo un Acuerdo de Cooperación Científica que incluye la Universidad de Arizona, la Universidad de Hawai y el Centro de Tecnología Avanzada Lockheed Martin (LM-ATC). La oficina del Programa de desechos orbitales de la NASA proporciona fondos para el observatorio y UKIRT comparte el tiempo de observación entre estos grupos. El Reino Unido sigue dando soporte y recibiendo a cambio un porcentaje del tiempo de observación para proyectos de interés compartido.

El telescopio ha sido objeto de amplias actualizaciones a lo largo de su historia. Aun así, será dado de baja después de la finalización del Telescopio de Treinta Metros (TMT) como parte del Plan Integral de Gestión de Mauna Kea y si finalmente el TMT se instala en Hawái. La planificación detallada para la eliminación del telescopio UKIRT y la restauración del sitio comenzarán después de que se completen los procesos de desmantelamiento de los telescopios de Caltech y Hoku Kea.

UKIRT sigue siendo muy productivo, con áreas de trabajo actuales que incluyen estudios de desechos orbitales, observación y catalogación de objetos cercanos a la Tierra y proyectos de estudios astronómicos líderes en el mundo. Uno de los hitos de este telescopio es el *UKIRT Infrared Deep Sky Survey* (UKIDSS).



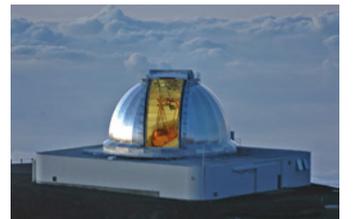
### WIRO

Wyoming Infrared Observatory (WIRO) se halla en el Monte Jelm, en Wyoming, EEUU, a casi 3.000 m de altura. De 2,3 m de abertura, es propiedad de la Universidad de Wyoming y empezó a observar en 1977, siendo entonces el mayor telescopio infrarrojo del mundo hasta que ese puesto se lo arrebató el UKIRT solo un año después.

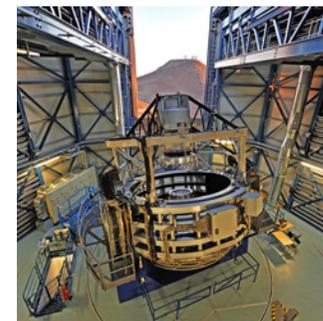
© C. Ready.

### IRTF

NASA Infrared Telescope Facility (IRTF) es un telescopio de 3,2 m de diámetro optimizado para su uso en astronomía infrarroja y ubicado en el Observatorio de Mauna Kea, en la isla de Hawái. Inaugurado en 1979 para respaldar las misiones espaciales Voyager, actualmente es la instalación nacional de los EEUU para la astronomía infrarroja, especializado en la observación del Sistema Solar.



© MPIA



### VISTA

El más moderno y el mayor de los telescopios infrarrojos en tierra es VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy). Con un espejo primario de 4,1 m y situado en el observatorio de Cerro Paranal del ESO en Chile, entró en servicio en 2009. Desarrollado por un consorcio de 18 universidades británicas, fue el «pago en especie» que el Reino Unido hizo para formalizar su adhesión al ESO.

© G. Hüdepohl (atacamaphoto.com)/ESO

# El Telescopio Carlos Sánchez TCS

El Telescopio Carlos Sánchez (TCS), en sus inicios conocido simplemente como "Colector de flujo", se encuentra instalado en el Observatorio del Teide, del Instituto de Astrofísica de Canarias, a 2.400 m de altitud. Fue diseñado y construido por el Imperial College of Science Technology and Medicine (ICSTM) británico, bajo la dirección del Prof. **James Ring**, en colaboración con otros grupos del Reino Unido y del IAC. Este telescopio, de 1,52 m de diámetro, el mayor telescopio infrarrojo de la época, entró en servicio, tras un período de pruebas, en abril de 1972.



Telescopio Carlos Sánchez (TCS). © IAC

## ALGO DE HISTORIA

Originariamente fue diseñado como un colector de flujo de bajo coste para astronomía infrarroja. La idea era fabricar una especie de maqueta, en el sentido de un telescopio a menor escala, del futuro telescopio británico UKIRT, de 3,8 m de espejo, que se instalaría en Hawái. Tenerife fue elegido para la instalación del telescopio después de un período de dos años probando el mejor lugar entre Tenerife, La Palma y Sierra Nevada.

Lo que se pretendía básicamente era demostrar que el diseño era el adecuado y que realmente se podía construir con garantías un telescopio infrarrojo, hecho para el que entonces no había experiencia. Por tal motivo, se intentó que la fabricación del mismo fuese muy barata, ahorrando en diversos componentes. La mayor parte del telescopio no está hecho de material reciclado, sino de material original. Sin embargo, para ahorrar, sí que es cierto que el hierro de la estructura procede de un cañón ruso de la Segunda Guerra Mundial. El presupuesto total del telescopio fue tan sólo de 58.000 libras esterlinas, unos 67.000 euros, que a día de hoy serían unos 400.000 euros. No fue el telescopio más barato del mundo, pero sí salió muy bien de precio. Un telescopio infrarrojo y visible de su tamaño costaría hoy en día no menos de 2.000.000 euros.

En su momento, el TCS fue el mayor telescopio infrarrojo del mundo, con un espejo principal de 1,52 m de diámetro, y actualmente se mantiene todavía entre los mayores telescopios infrarrojos, más de cincuenta años después de su puesta en marcha. Lo realmente impresionante es que se diseñó y construyó para tener una vida muy corta, y ahí sigue todavía, generando ciencia de altísima calidad. Por supuesto, en esto el IAC ha tenido una gran parte de culpa.

En 1983, el Science and Engineering Research Council (SERC), propietario original del telescopio, traspasó al IAC la responsabilidad del mismo, y se inició una serie continuada de mejoras para mantener el telescopio en condiciones competitivas: creación de servicios técnicos de mantenimiento instrumental y contratación de observadores para la ayuda en las observaciones, automatización del control y de la adquisición de datos llevadas a una sala anexa convertida en Sala de Control, instalación de instrumentación de uso común (utilización por cualquier usuario de la comunidad científica) y mejora y optimización de la estructura general del telescopio para aumentar las prestaciones en precisión de apuntado y seguimiento.

Este telescopio lleva el nombre de **Carlos Sánchez Magro**, catedrático de Astrofísica de la Universidad de La Laguna y

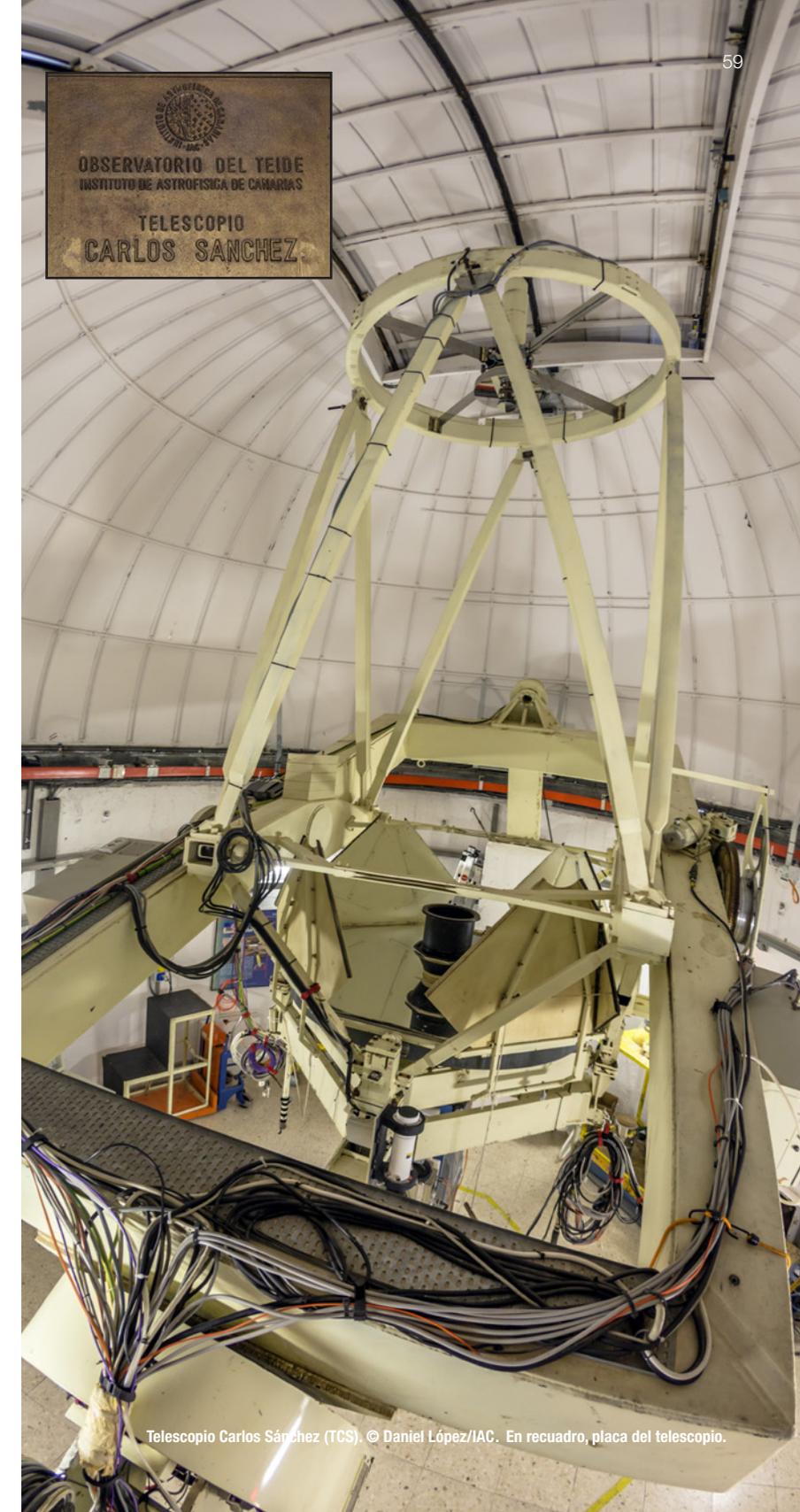
miembro muy destacado del IAC desde sus orígenes que falleció en 1985, unos días después de la inauguración de las instalaciones y observatorios del IAC. Se le considera el padre de la astronomía infrarroja española por formar a los primeros astrónomos españoles en este campo, obtener los primeros resultados científicos, producir las primeras publicaciones y desarrollar los primeros instrumentos. (*Más información sobre Carlos Sánchez Magro, en siguientes páginas*). En 1993 fallecería también su colaborador británico **Mike Selby**, del Imperial College de la Universidad de Londres. Este experto en astronomía infrarroja estuvo desde el primer momento muy vinculado al TCS y a todos los proyectos infrarrojos del IAC, centro donde se encontraba durante los últimos años como profesor visitante.

## CARACTERÍSTICAS DEL TCS

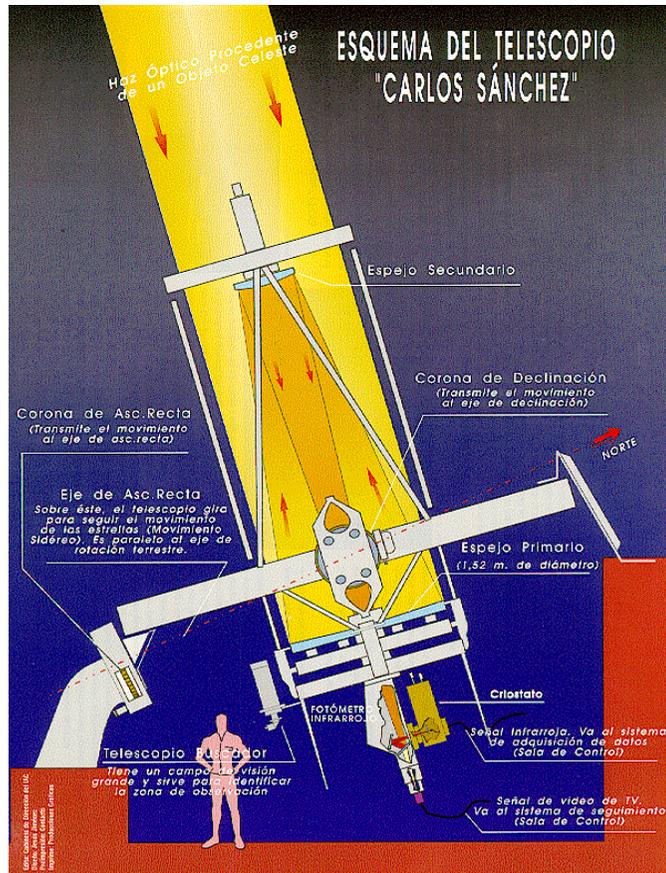
El diseño de este telescopio aportó varias novedades en cuanto a su construcción. Fue, por ejemplo, el primero con un espejo delgado (tiene una relación entre el grosor y el diámetro de aproximadamente 1/12). Esto tiene la ventaja de que se enfría muy rápidamente a temperatura ambiente, implicando como contrapartida que se pueden producir deformaciones al mover el telescopio. Aunque los requerimientos del diseño imponían una figura precisa de hasta 5 segundos de arco, el resultado fue mejor que 2 segundos de arco, con lo que el telescopio puede utilizarse también para trabajos en el visible. Otra novedad fue la reducción, al mínimo posible, del peso y el tamaño del tubo del telescopio y el apoyo del secundario. Con estas características, se disminuye la emisión térmica del propio telescopio, aunque a costa de aumentar las flexiones.

El espejo primario del TCS está fijo en una estructura ecuatorial, con un foco Cassegrain y F/13,8 en una configuración de tipo Dall-Kirkham (primario elipsoidal F/3 y secundario esférico). Tiene una distancia focal efectiva de 21,03 m.

El TCS es un telescopio fundamentalmente para observaciones en el rango infrarrojo, aunque su excepcional óptica hace que pueda observar también, sorprendentemente, en el rango visible. A lo largo de su historia el telescopio ha visto la instalación de numerosos instrumentos que ya no están en funcionamiento, desde los iniciales **fotómetros negro y rojo**; los también **fotómetros 4 canales, 32 elementos, Oxford, azul, CVF y FIN**; **SCIDAR**, para medir la intensidad de la turbulencia atmosférica y su dependencia con respecto a la altitud;

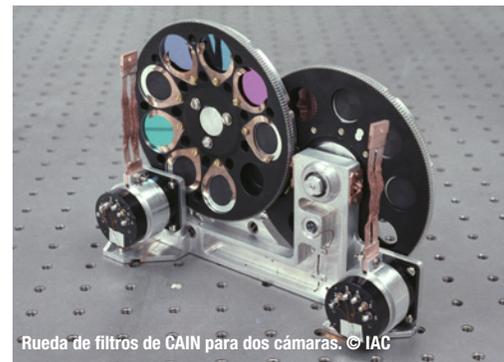


Telescopio Carlos Sánchez (TCS). © Daniel López/IAC. En recuadro, placa del telescopio.



infrarrojo como en el visible, si bien temporalmente solo se está trabajando en esta última longitud de onda a la espera de una nueva instrumentación infrarroja proyectada. Los instrumentos actuales del TCS son FastCam y MuSCAT2.

**FastCam** es un instrumento desarrollado por el IAC y la Universidad Politécnica de Cartagena con el objetivo de obtener imágenes de muy alta resolución espacial en el rango visible con telescopios terrestres usando la técnica de *lucky imaging*. Consiste en un detector L3CCD de muy bajo nivel de ruido y muy rápida velocidad de lectura que permite alcanzar el límite de difracción, fundamentalmente en banda I, con telescopios de tamaño intermedio. Incorpora un sistema de transmisión y evaluación rápida de imágenes y un software propio desarrollado para procesado eficiente de decenas de miles de imágenes. FastCam toma imágenes a muy alta velocidad (pocos milisegundos), de manera que los cambios, y la turbulencia, en la atmósfera terrestre son mínimos. Esto hace que se puedan obtener imágenes de altísima calidad y resolución, llegándose de manera rutinaria a resoluciones por debajo de 0,2 segundos de arco.



Rueda de filtros de CAIN para dos cámaras. © IAC



CAIN-III en el TCS. © IAC

los visitantes **SYMA** y **Chevreton**; así como **Horufise**, un híbrido de los instrumentos **HORS** y **EDIFISE**.

Un instrumento importante fue **CAIN**, cámara construida en el Área de Instrumentación del IAC e instalada por primera vez en 1994, para observaciones en el infrarrojo cercano, en el rango espectral comprendido entre 1 y 2,5 micras. Estuvo equipada con un detector clase NICMOS3 de HgCdTe cuyo formato era de 256x256 píxeles, con un tamaño de píxel de 40 micras. Después de su instalación en el TCS, y a medida que mejoró la calidad del telescopio, se realizaron variaciones en la estructura de la cámara para aumentar la calidad del conjunto (telescopio-cámara). Estos proyectos se denominaron **CAIN-I**, **CAIN-II** y **CAIN-III**. Fue retirado en enero de 2019.

#### INSTRUMENTOS ACTUALES

Hoy en día, el uso principal del telescopio sigue siendo la realización de observaciones científicas, tanto en el



FastCam montado en el foco Cassegrain del telescopio Carlos Sánchez.

**MuSCAT2**, desarrollado por el Centro de Astrobiología de los Institutos Nacionales de Ciencias Naturales de Japón, en colaboración con el IAC. Es un instrumento para la captación de imágenes y fotometría multicolor simultánea en cuatro bandas del rango de longitudes de onda visibles. Su objetivo fundamental es el estudio de exoplanetas en tránsito. El acuerdo entre los fabricantes de MuSCAT2 y el IAC para su uso en el TCS ha permitido obtener más de 100 publicaciones en los últimos cinco años.

Asimismo, al TCS se le puede adaptar una cámara sCMOS llamada **CARONTE**, que se usa en el telescopio IAC-80, también del Observatorio del Teide.

#### PRESENTE Y FUTURO

En los últimos tiempos se ha invertido también un esfuerzo importante para remozar el telescopio, de manera que pueda usarse de forma no presencial desde cualquier lugar del mundo. Finalmente, se consiguieron realizar las primeras observaciones desde la sede central del IAC, y ahora el TCS se utiliza habitualmente de esta forma. En ocasiones, opera junto con otros telescopios, principalmente en el Observatorio del Teide (OGS e IAC-80), para observaciones complementarias en distintas longitudes de onda o para investigaciones de la estructura atmosférica.

La versatilidad de los programas llevados a cabo en este telescopio se ha incrementado profundamente desde que el IAC asumió la responsabilidad del TCS, debido principalmente a la implantación del carácter de instrumentación de uso común. Y ha servido para potenciar la astronomía infrarroja en España, proporcionando medios para que una generación de astrónomos se formara utilizando los recursos de este telescopio.

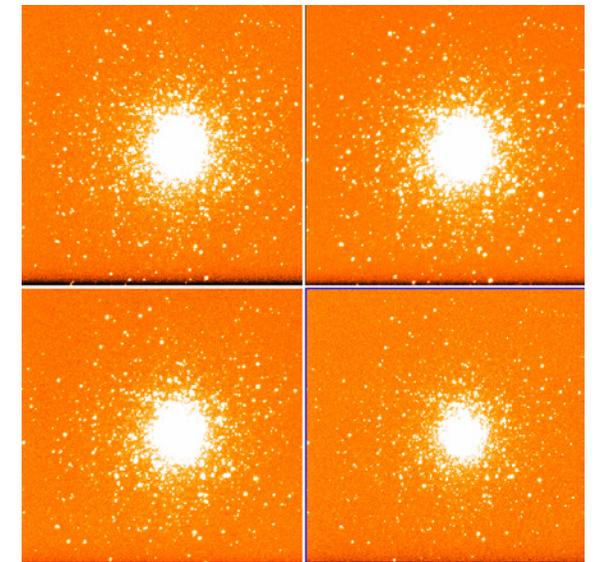
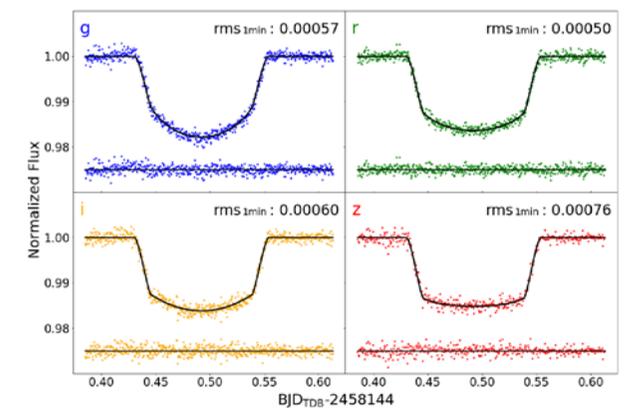
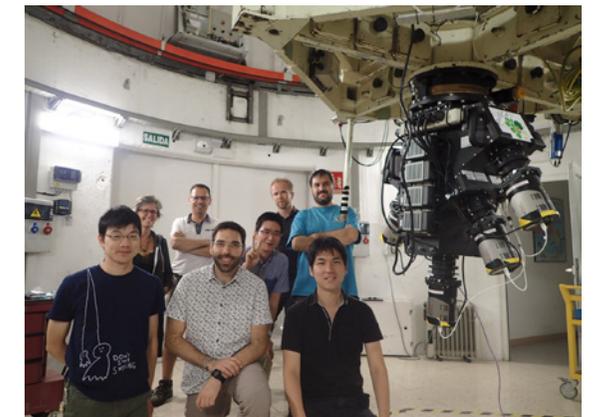


Imagen de la primera luz de MuSCAT2 del cúmulo globular M31.



Curvas de luz simultáneas del exoplaneta WASP-12b, obtenidas con gran precisión fotométrica durante la puesta en marcha de MuSCAT2.



Parte del equipo de desarrollo de MuSCAT2 durante su instalación en el telescopio.

Además, el telescopio ha servido y sirve como banco de pruebas para adquirir la experiencia necesaria con la que emprender la construcción de grandes telescopios y para nueva instrumentación a instalar en telescopios mucho mayores o incluso en satélites. También tiene un uso destacado en prácticas de alumnos de Astrofísica de universidades de todo el mundo y es uno de los telescopios que se pueden visitar en las jornadas de Puertas Abiertas del Observatorio del Teide.

ÁLEX OSCOZ,  
astrofísico y jefe de Operaciones Telescópicas del IAC  
OLGA ZAMORA,  
astrónoma de soporte de los Observatorios de Canarias



Telescopio Carlos Sánchez, en primer plano, con el telescopio IAC-80, detrás.  
© Daniel López/IAC



Telescopio Carlos Sánchez, en una jornada de Puertas Abiertas. © Daniel López/IAC

## MEJORAS CONTINUAS E INSTRUMENTACIÓN

“Cuando se puso en marcha el TCS -recuerda **Carlos Martínez Roger**, astrónomo responsable del mismo al comienzo de la década de los 90- fue el primer telescopio en el mundo dedicado a la nueva técnica de la astronomía infrarroja. Después se mantuvo como uno de los mayores telescopios dedicados a este mismo fin, en tercer lugar, junto con otros dos telescopios de 1,5 m, el italiano TIRGO (en Gornergrat, Suiza, y operativo hasta 2005) y el americano de Mount Lemmon (Arizona, EEUU), tras el UKIRT, de 3,8 m, y el IRTF, de 3,5 m, de la NASA, ambos en Mauna Kea (Hawái, EEUU). También se mantuvo como el único telescopio donde todos los astrofísicos españoles podían realizar observaciones fotométricas en el infrarrojo de forma directa a través de la Comisión de Asignación de Tiempo (CAT) en los Observatorios de Canarias.”

A lo largo de sus más de cincuenta años en el Observatorio del Teide y con objeto de ofrecer un mejor servicio a la comunidad astronómica, el TCS ha sido objeto de continuas reformas y mejoras. El responsable de muchas de las mismas, el astrofísico **Jesús Jiménez Fuensalida**, también a cargo de los telescopios nocturnos del IAC durante años, destaca la automatización de algunos procesos. “Por ejemplo, se mejoró el apuntado, que antes había que hacer a mano con el buscador, aunque con ello se perdió parte del romanticismo que históricamente ha acompañado a la observación astronómica. Se actualizaron los codificadores, que en un principio ni siquiera el telescopio tenía, lo que cambió absolutamente el funcionamiento. Para cambiar los filtros, antes había que ir a la cúpula y, tras la reforma, ya todo se podía hacer cómodamente desde una sala de control. Un hito importante en su día fue la incorporación de FOVIA, el sistema de adquisición y guiado de los telescopios nocturnos del IAC -entonces, TCS e IAC-80-, así como la posibilidad de búsqueda automática de la estrella guía del catálogo GSC (*Guide Star Catalogue*) y de definir cuatro posiciones de guiado para el TCS, lo que permitió una correcta calibración del detector de instrumentos como CAIN. En 2014, se procedió al espectacular desmontaje de la cúpula, reparación de las partes dañadas, instalación de nuevos sistemas, reposición de piezas, calibración, ajustes y, finalmente, de nuevo el montaje de la cúpula.” La operación se ha repetido en 2022, junto con otras reparaciones y mejoras, dejando el telescopio en condiciones de seguir una larga temporada.

“**Vicente Sánchez, Juan Calvo y Lorenzo Peraza**, ingenieros mecánicos del IAC -el último de ellos, ya fallecido lamentablemente-, trabajaron lo indecible en la estructura inicial del telescopio para asegurar que se mantuvieran las prestaciones del telescopio -subraya Jesús Jiménez-, aunque



Telescopio Carlos Sánchez (TCS), con la Vía Láctea al fondo. © Daniel López/IAC

en los reajustes y mejoras participaron todos los departamentos y talleres del Área de Instrumentación y Mantenimiento General del Observatorio del Teide, además de astrofísicos del IAC.”

**José Miguel Rodríguez Espinosa**, experto en astronomía infrarroja y coordinador del Área de Investigación del IAC en los noventa, señalaba que el Telescopio Carlos Sánchez seguía siendo una importante herramienta para la observación astronómica infrarroja. “Sin embargo -advertía-, los últimos avances en el

campo de la tecnología de los detectores infrarrojos amenazaban con dejarlo obsoleto en poco tiempo si no se actuaba modificando su instrumentación”. De ahí que en el balance de la eficiencia y productividad del TCS se deben tener en cuenta las mejoras continuas introducidas desde que en 1983 fuera traspasado al IAC, así como toda la instrumentación desarrollada para este telescopio por el personal del Instituto.

## ALGUNOS RESULTADOS CON EL TCS

El Telescopio Carlos Sánchez (TCS) es idóneo para observar los objetos "fríos", como estrellas en las últimas fases de su evolución. Desde su instalación, ha sido utilizado para un rango muy amplio de programas de observación: desde un mapa a gran escala del centro de la Vía Láctea a las oscilaciones estelares; y desde fotometría visible hasta espectroscopía en 10 micras. Entre sus resultados también destacan:

- Descubrimiento del exceso infrarrojo de Vega y su probable sistema protoplanetario, publicado en 1983, basado en observaciones con el TCS exclusivamente.
- Observaciones del cometa Halley en 1986.
- Primer programa extenso de vigilancia infrarroja de blázares para el estudio de su curva de luz, que realizó **Mark Kidger**.
- Primeras imágenes infrarrojas del impacto en el planeta Júpiter del cometa P/Shoemaker-Levy 9 en 1993.
- Imágenes de objetos subestelares, como G196-3B y enanas marrones del cúmulo de sigma Orionis.
- Creación de un catálogo de galaxias con formación estelar en la banda de emisión de Halfa -el primero de este tipo-, que incluye 70 de estos objetos. Este proyecto requirió una inmensa cantidad de tiempo de observación.
- Fotometría del asteroide 2002 NY40, que atravesó rápidamente el cielo a una distancia de 450.000 km.
- Observación en 2013, conjunta con el IAC-80, de la ocultación de la estrella HIP 107302 por Júpiter, desveló el estado de la atmósfera de este planeta.
- Determinación empírica de la escala de temperaturas de las estrellas.

Durante los años 80, los astrofísicos del IAC y la ULL **María Jesús Arévalo, Carlos Lázaro, Jesús Jiménez Fuensalida** y otros autores realizaron observaciones sistemáticas de estrellas binarias de diferentes tipos, principalmente Algol y Cataclísmicas, con el objetivo de determinar sus parámetros físicos, analizando sus curvas de luz fotométricas y las curvas de velocidad radial obtenidas a partir de observaciones espectroscópicas. Con frecuencia los datos del TCS se han combinado con los de otros observatorios y telescopios.

Los astrofísicos **Ángel Alonso, Santiago Arribas** y **Carlos Martínez Roger** realizaron fotometría infrarroja de banda ancha JHK, con el TCS, de una amplia muestra de enanas y subenanas (360 objetos) de tipo tardío. Estos autores también calibraron empíricamente las temperaturas efectivas de estrellas gigantes basándose en una gran muestra de estrellas de campo y de cúmulos globulares que cubrían los tipos espectrales de F0 a K5. Este trabajo de calibración, una herramienta necesaria para interpretar las observaciones en relación con la teoría, dio lugar a un reconocido artículo científico en A&A Suppl. Ser. 140, 261-277 (1999), muy citado posteriormente.

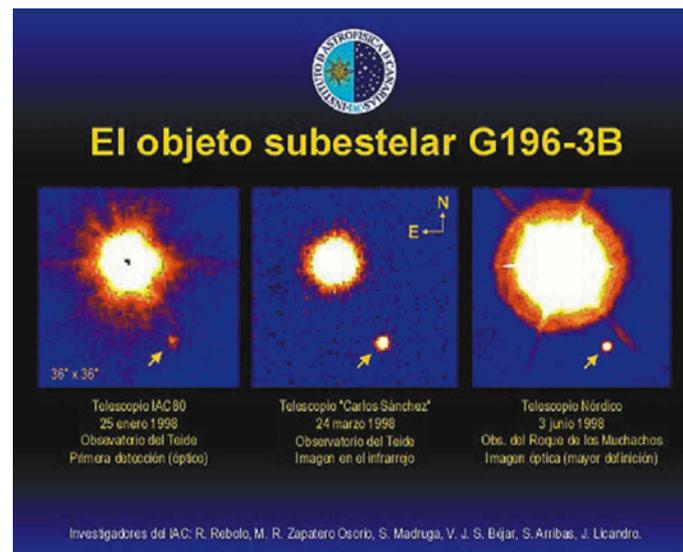
En la actualidad, el TCS sigue generando resultados científicos de altísimo nivel, ya son 425 artículos en revistas internacionales con árbitro, por lo que este joven de más de 50 años todavía mantiene una salud envidiable.

### LA ENANA MARRÓN G196-3B

Las enanas marrones son un objeto intermedio entre las estrellas y los planetas, una especie de estrellas frustradas cuya masa es insuficiente para tener reacciones nucleares de fusión de hidrógeno en su interior que las haga brillar. Debido a su falta de luminosidad, las enanas marrones son difíciles de encontrar.

La evolución de estos objetos astrofísicos, como la de tantos otros en el Universo, depende de la masa inicial con que se formen. Son objetos tan fríos y se enfrían tan rápidamente que apenas emiten radiación en la zona óptica del espectro electromagnético (por tanto, difícilmente observables en este rango); sin embargo, podemos detectar su radiación infrarroja.

La diferencia entre un planeta gigante, como Júpiter, y la enana marrón más pequeña posible podría encontrarse en su mecanismo de formación. Si bien los planetas nacen dentro de un sistema planetario



Imágenes de la enana marrón G196-3B, obtenidas por varios telescopios de Canarias. © IAC.

en torno a una estrella, las enanas marrones también pueden hacerlo individualmente, como consecuencia de la fragmentación de una nube molecular en el medio interestelar.

Intuyendo la importancia de estos objetos, el IAC aprobó en 1994 un proyecto liderado por **Rafael Rebolo** de búsqueda de enanas marrones y planetas extrasolares, cuyo primer gran éxito fue el descubrimiento, en 1995, de la enana marrón Teide 1 en el cúmulo de las Pléyades, la primera de una serie. Posteriormente también se descubrió una enana marrón (G196-3B) que orbita alrededor de una estrella normal llamada G196-3, perteneciente a la constelación de la Osa Mayor. La pareja de cuerpos celestes se encuentra a 50 años luz de distancia de la Tierra, es decir, a unos 475 billones de kilómetros. La masa de esta enana marrón equivale a 25 veces la de Júpiter, el planeta más grande del Sistema Solar, lo que la convertía en la enana marrón menos masiva de las descritas hasta entonces. Según las escalas planetarias, esta enana marrón se sitúa bastante lejos de la estrella alrededor de la cual orbita: unas siete veces más que la distancia entre el Sol y Plutón.

El TCS contribuyó a la detección de esta enana marrón, de la que también se obtuvieron imágenes con telescopios ópticos desde los Observatorios de Canarias. El descubrimiento se publicó en la revista *Science*.

### CÚMULO DE SIGMA ORIONIS

Investigadores del IAC realizaron un estudio fotométrico del cúmulo de Sigma Orionis en las bandas R, I y J con los telescopios TCS, OGS e IAC-80, identificándose más de un centenar de estrellas de muy poca masa y candidatos a enanas marrones. Obtuvieron imágenes ópticas y de infrarrojo cercano de una población de objetos aislados extremadamente rojos y de baja luminosidad en el joven cúmulo estelar cercano alrededor de sigma Orionis, la cuarta estrella más brillante del Cinturón de Orión. La proximidad (1.150 años luz), la juventud (entre 1 millón y 5 millones de años) y la baja extinción interna hacen de este cúmulo un sitio ideal para explorar el dominio subestelar desde el límite de masa del hidrógeno hasta unas pocas masas de Júpiter.

La espectroscopía de baja resolución óptica e infrarroja cercana de tres de estos objetos confirmó la distribución de energía espectral muy fría (temperaturas atmosféricas efectivas de 1.700 a 2.200 Kelvin) esperada para los

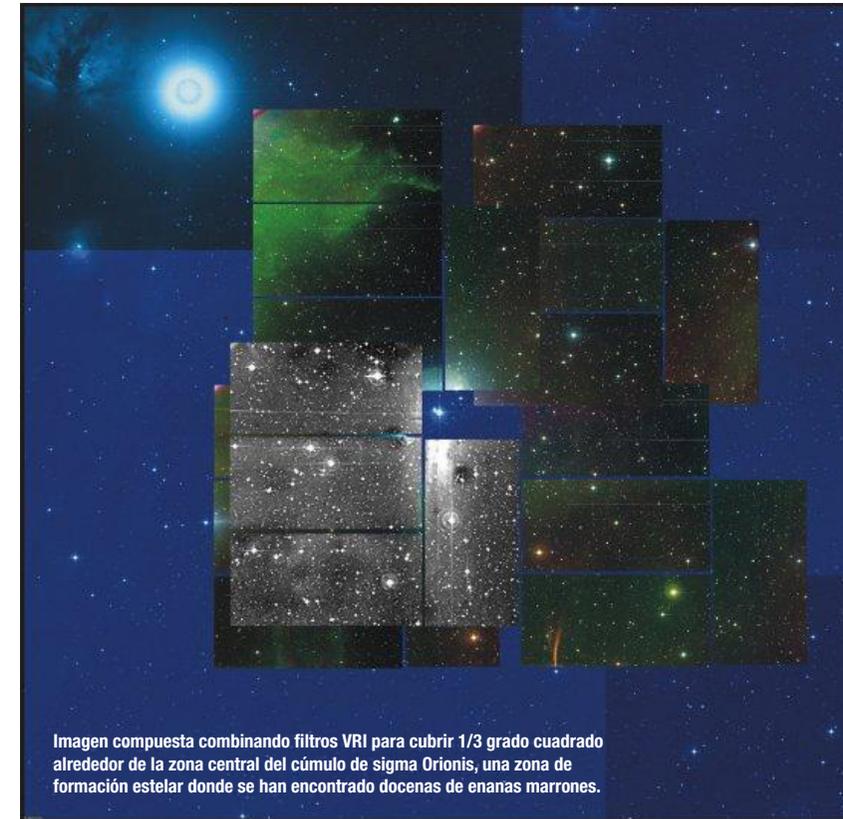


Imagen compuesta combinando filtros VRI para cubrir 1/3 grado cuadrado alrededor de la zona central del cúmulo de sigma Orionis, una zona de formación estelar donde se han encontrado docenas de enanas marrones.

miembros del cúmulo con masas en el rango de 5 a 15 veces la de Júpiter. Al igual que los planetas del Sistema Solar, estos objetos no pueden mantener una combustión nuclear estable en su interior, pero, por el contrario, no están ligados a las estrellas. Este nuevo tipo de planeta gigante aislado, que aparentemente se forma en escalas de tiempo de menos de unos pocos millones de años, desafiaba la comprensión de los procesos de formación de los objetos de masa planetaria.

En 2007, un equipo liderado también por el IAC descubrió una abundante población de objetos subestelares, incluyendo más de una decena de objetos aislados de masa planetaria (denominados IPMOs) y enanas marrones, en este cúmulo alrededor de sigma Orionis. Además, descubrieron que aproximadamente la mitad de las enanas marrones de este cúmulo tienen discos protoplanetarios, es decir, discos de material en los que probablemente se están produciendo los procesos físicos que llevan a la formación de planetas. En la investigación se utilizaron diferentes instrumentos en el óptico y el infrarrojo, entre ellos nuevamente el TCS.

# Las enanas marrones las enanas más "infrarrojas"

Las enanas marrones son cuerpos celestes con masas intermedias entre las estrellas y los planetas, entre 75 y 13 veces la masa de Júpiter. En su interior no se alcanzan las temperaturas necesarias para la quema de hidrógeno como en las estrellas y, por tanto, no llegan a la Secuencia Principal, donde la temperatura y la luminosidad permanecen estables. Por el contrario, las enanas marrones evolucionan a lo largo del tiempo haciéndose cada vez más débiles y más frías. La temperatura efectiva de las enanas marrones es menor que unos 3.000 K, de modo que emiten la mayor parte de su luz en el infrarrojo.

En el año 1995 se produjo el descubrimiento de la primera enana marrón, Teide 1, en el cúmulo de las Pléyades, por parte del grupo del IAC formado por **Rafael Rebolo, María Rosa Zapatero Osorio y Eduardo Martín**, así como de Gl229B, compañera de la estrella de la vecindad solar del mismo nombre, por el grupo de Caltech. Estos primeros descubrimientos

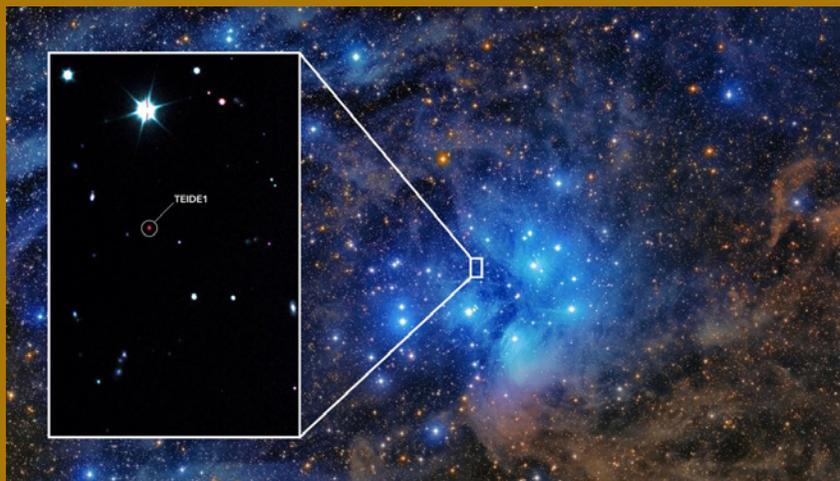


Imagen de la enana marrón Teide 1 (© Gran Telescopio Canarias) localizada en el cúmulo abierto de las Pléyades. © Daniel López /Alfred Rosenberg (IAC)

fueron debidos fundamentalmente a los avances tecnológicos, como el desarrollo de telescopios de mayor tamaño y detectores e instrumentos más sensibles en la parte roja del espectro visible y el infrarrojo. Desde entonces se han encontrado varios miles de enanas marrones, debido fundamentalmente a los cartografiados de todo el cielo o gran parte de él, en el infrarrojo, tales como *Two Micron All-Sky Survey* (2MASS), *DEep Near-Infrared Survey* (DENIS), *The UKIRT Infrared Deep Sky Survey* (UKIDSS), *Vista Hemisphere Survey* (VHS) o *Wide-Field Infrared Survey Explorer* (WISE).

Desde los primeros años, el IAC ha sido pionero en los estudios de los objetos subestelares en el infrarrojo. El propio descubrimiento de Teide 1 se hizo gracias a que el grupo del IAC fue el primero en buscar estos objetos en el filtro infrarrojo I, más al rojo de lo que puede detectar nuestro ojo. En esos primeros años se llevaron a cabo numerosos estudios de enanas marrones en cúmulos abiertos jóvenes con las primeras cámaras infrarrojas



Primeros objetos de masa planetaria aislados confirmados espectroscópicamente en el cúmulo de sigma Orionis. © Gabriel Pérez, SMM (IAC)

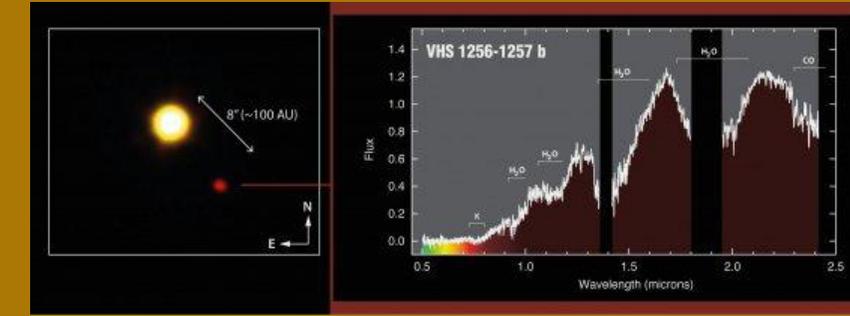
disponibles, como la Cámara Infrarroja (CAIN), en el telescopio Carlos Sánchez, la *MPI für Astronomie General-Purpose Infrared Camera* (MAGIC), en el telescopio de 2,2 m de Calar Alto en Almería, o la *Infrared Spectrometer And Array Camera* (ISAAC), en el VLT, en Chile. El grupo del IAC fue pionero en la búsqueda de estos objetos combinando por primera vez datos ópticos e infrarrojos, lo que permitió encontrar los primeros planetas aislados en el cúmulo de sigma Orionis y determinar por primera vez el número de enanas marrones que hay en relación al número de estrellas en esta región de formación, lo que se denomina la función inicial de masas.

Nuestros estudios pioneros de la función inicial de masas en cúmulos abiertos jóvenes como sigma Orionis y las Pléyades indican que los objetos subestelares son muy numerosos, hasta el 30%, pero su contribución de masa en los cúmulos abiertos jóvenes es inferior al 10 %. Los candidatos espectroscópicos más débiles y fríos que hemos encontrado en estas regiones son críticos para determinar la masa mínima de formación estelar y entender cómo se forman estos objetos.

Desde 2006, los estudios de cúmulos llevados a cabo por el IAC con UKIDSS o VHS condujeron a la identificación de cientos de miembros subestelares en regiones como sigma Orionis, Pléyades, Upper Sco, IC 4665 o Praesepe. Esto permitió determinar que las funciones de masa son similares en todas las regiones, indicando que la función de masas en nuestra galaxia puede ser universal.

El grupo del IAC también ha sido pionero en la identificación de compañeros subestelares alrededor de estrellas jóvenes como G196-3B o UScoCTIO108B, en el que fueron fundamentales los telescopios de los Observatorios de Canarias, como el IAC-80 y el TCS. Nuestras búsquedas más recientes de compañeros subestelares alrededor de estrellas en grupos de movimiento o asociaciones jóvenes llevaron al descubrimiento de varios compañeros de masa planetaria, que han servido de referencia. Entre ellos destaca VHS1256b, descubierto en 2015 por miembros del IAC, uno de los primeros objetos subestelares fotografiados directamente y caracterizado espectroscópicamente por el James Webb Space Telescope (JWST) tanto en el infrarrojo cercano como en el infrarrojo medio.

VÍCTOR SÁNCHEZ BÉJAR,  
astrofísico del IAC



Panel izquierdo: imagen del planeta situado a 100 UA de la estrella enana VHS 1256. La imagen en falso color ha sido elaborada a partir de imágenes YJK tomadas con el telescopio VISTA, del Observatorio Europeo Austral (ESO Astronomy) dentro del VISTA Hemisphere Survey (VHS). Panel derecho: espectros óptico e infrarrojo del exoplaneta tomados con el Gran Telescopio Canarias (GTC), en el Observatorio del Roque de los Muchachos, y con el New Technology Telescope (NTT), en el Observatorio de La Silla, respectivamente. © Gabriel Pérez, SMM (IAC)

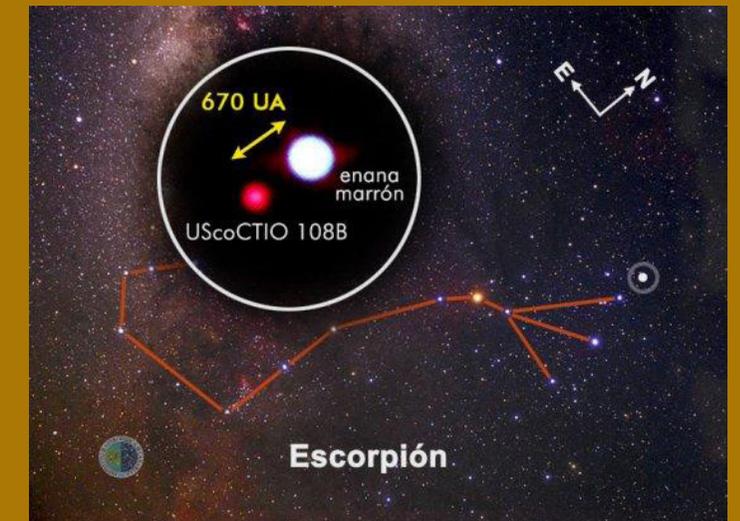


Imagen de la constelación del Escorpión y de la situación dentro de la misma del sistema binario entre la enana marrón y el objeto de masa planetaria, representados en falso color. Ambas se encuentran entre sí a una separación de 670 UA (unidades astronómicas). © Gabriel Pérez, SMM (IAC)

#### REFERENCIAS:

- Rebolo, R.; Zapatero-Osorio, M.R.; y Martín, E.L. (1995). "Discovery of a brown dwarf in the Pleiades star cluster". *Nature*, 377, 129-131.
- Rebolo, R.; Osorio, M.R.Z.; Madruga, S.; Béjar, V.J.S.; Arribas, S., Licandro, J. (1998). "Discovery of a low-mass brown dwarf companion of the young nearby star G 196-3". *Science*, 282, 5392, 1309-1312.
- Zapatero Osorio, M.R.; Béjar, V.B.; Martín, E.L., Rebolo, R.; Barrado y Navascués, D.; Bailer-Jones, C.A.; Mundt, R. (2000). "Discovery of young, isolated planetary mass objects in the final sigma Orionis star cluster". *Science*, 290, 5489, 103-107.
- Caballero, J.A.; Béjar, V.J.S.; Rebolo, R.; Eisloffel, J.; Zapatero Osorio, M.R.; Mundt, R.; Barrado y Navascués, D.; Bihain, G.; Bailer-Jones, C.A.L.; Forveille, T.; y Martín, E.L. (2007). "The substellar mass function in sigma Orionis. II. Optical, near-infrared and IRAC/Spitzer photometry of young cluster brown dwarfs and planetary-mass objects". *A&A*, 470, 903-918.

## LA PRIMERA TESIS Y LA PRIMERA TESINA CON CAIN

La astronomía observacional siempre ha ido a la par de las nuevas innovaciones tecnológicas, y el infrarrojo cercano (NIR, *Near InfraRed*) no es una excepción. Con los desarrollos en los detectores para estas longitudes de onda en la segunda mitad del siglo XX, a los astrónomos se nos ha ido descubriendo poco a poco una nueva manera de ver el Universo.

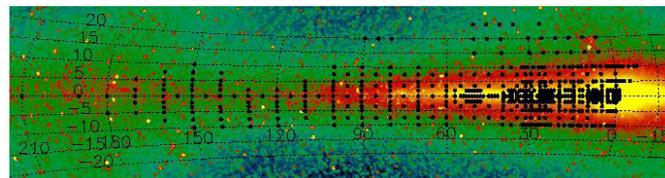
### "ANÁLISIS MORFOLÓGICO MULTIBANDA DEL CONTENIDO ESTELAR DEL PLANO Y DISCO DE LA VÍA LÁCTEA"

Empleando las bases de datos en el infrarrojo cercano más completas de las que se disponía, 2MASS, DENIS y principalmente TCS-CAIN (cartografiado privado del IAC desarrollado íntegramente mediante observaciones obtenidas en el Telescopio Carlos Sánchez con la cámara infrarroja CAIN), se analizó la distribución estelar del disco de nuestra galaxia.

Se obtuvo que la distribución de estrellas del disco externo de la Vía Láctea sigue una ley doble exponencial tanto en altura sobre el plano como a lo largo de la dirección radial, con un *flare* que hace que aumente la escala de altura de las estrellas a medida que nos alejamos del centro de la Galaxia y un *warp* o alabeo importante que produce fuertes asimetrías en la distribución estelar. Del mismo modo, se encontró un déficit de estrellas en la zona interna del plano de la Vía Láctea, probablemente asociada a la presencia de una barra galáctica de 4 kpc de semiamplitud, que ha barrido el material circundante.

Para poder obtener dichos resultados, fue imprescindible contar con la mayor profundidad alcanzada en los datos del TCS-CAIN, principalmente hacia el interior de la Galaxia, imposible de lograr con las bases de datos de DENIS y 2MASS.

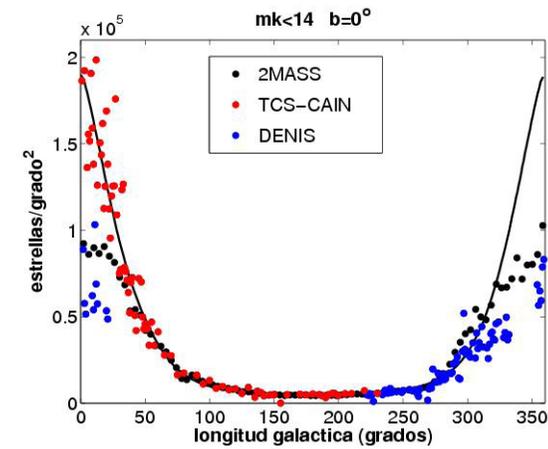
**Tesis doctoral de ANTONIO LUIS CABRERA LAVERS**  
Directores: Peter Lawrence Hammersley y Francisco Garzón López.  
Universidad de La Laguna, 2005



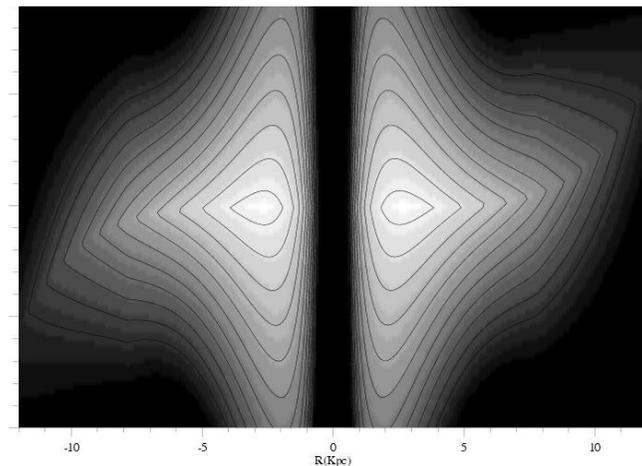
Distribución de los apuntados del survey TCS-CAIN en el plano de la Vía Láctea empleados en esta tesis.



Criostato de CAIN.



Cuentas estelares a lo largo del plano de la Vía Láctea combinando los resultados de 2MASS, CAIN y TCS-CAIN, donde se observa la mayor completitud alcanzada con los datos de TCS-CAIN en la zona interna comparada con los otros surveys.



Modelo de la estructura del disco de la Vía Láctea obtenido, con un déficit en la zona interna y con un *flare* y *warp* hacia el exterior de la Galaxia.

### "CARACTERIZACIÓN ÓPTICA-ELECTRÓNICA DE LA CÁMARA INFRARROJA CAIN"

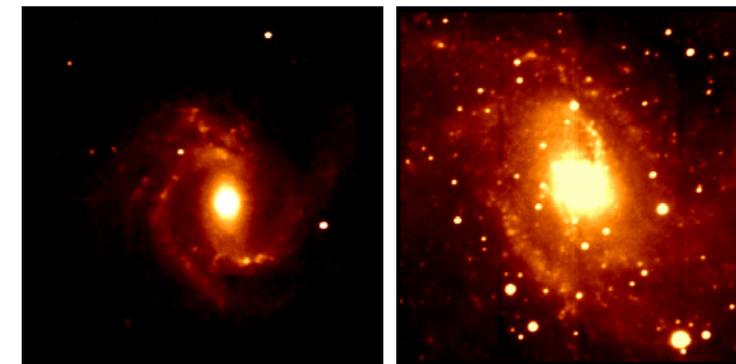
Considerado en el IAC el instrumento predecesor de EMIR y de algún modo su abuelo tecnológico, CAIN fue desarrollado y construido íntegramente por el Área de Instrumentación de este centro para operar en el TCS e instalado por primera vez en el telescopio en 1994. Se trataba de una cámara para observaciones en el infrarrojo cercano, más concretamente en el rango espectral comprendido entre 1-2,5 micras y equipado con un detector clase NICMOS3 de HgCdTe, cuyo formato era de 256x256 píxeles, con un tamaño de píxel de 40 micras y con dos ópticas distintas que ofrecían resoluciones de 1 a 0,39 arcsec/píxel. El detector estaba a su vez compuesto por cuatro cuadrantes de 128x128 píxeles y cada uno de ellos con su propia electrónica para leerlos de forma independiente.

### MEJORAS

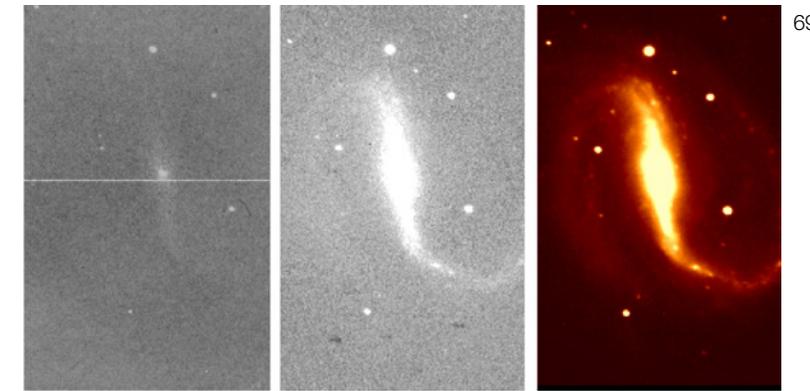
El trabajo desarrollado en esta tesina se basó principalmente en el estudio de datos obtenidos en cuatro campañas de observación llevadas a cabo con la cámara CAIN en distintas fases de su desarrollo (1998, 1999 y 2000). El objetivo era determinar el comportamiento de la cámara en las condiciones de trabajo en el telescopio y comprobar, además, si se habían cumplido los objetivos teóricos planteados al comienzo de las últimas reformas realizadas en CAIN. Era importante conocer el comportamiento de esta cámara al ser un instrumento de uso común en el TCS y su estado podría afectar a los estudios científicos que se llevaran a cabo con ella.

Las mejoras más profundas se habían realizado entre los años 1999 y 2000, e hicieron que la cámara pasara a llamarse CAIN-II. Los cambios más importantes fueron:

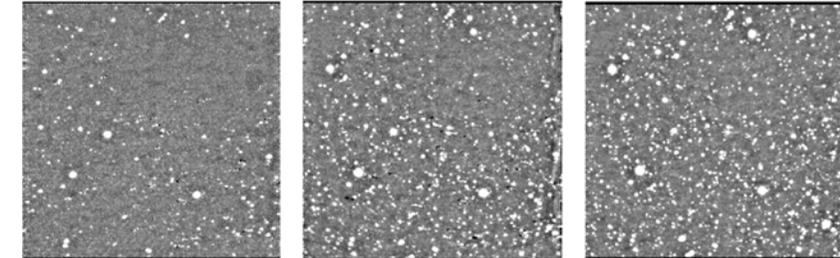
- Mejora del sistema de lectura reduciendo el ruido y aumentando la velocidad de la misma. Para esto se desarrollaron nuevos modos de lectura (CDS, Simple, Fowler y Rampa).
- Mejora del diseño óptico y de sus dos ópticas para tener dos tamaños de campo de visión.



Algunas de las galaxias observadas para esta tesina © Nieves Castro-Rodríguez/IAC.



Galaxias cercanas que se usaron para caracterizar CAIN-II. © Castro-Rodríguez N. y Garzón F., (2003) A&A, 411, 55



Estudio del plano de la Vía Láctea con CAIN en las bandas J, H y Kshort, respectivamente. La menor extinción en la banda Kshort revela estrellas que son imposibles de detectar en bandas más azules del infrarrojo o en el óptico. Estos datos forman parte de la tesis de Antonio Cabrera © Cabrera-Lavers et al., (2006) A&A, 453, 371

- Ante la falta de fiabilidad en la electrónica original compuesta por microprocesadores, sustitución por un controlador de tipo SDSU (San Diego State University) para el detector, que ya operaba en cámaras de estas características en otros telescopios.

- Mejoras del cableado, bafleado y en las ruedas de filtros y cámaras.

Los resultados finales fueron muy positivos y se corroboró que los cambios habían producido una mejora sustancial en los datos científicos.

Este trabajo coincidió con las etapas de finalización de LIRIS en el IAC, otro hito infrarrojo de su Área de Instrumentación que luego continuaría en el tiempo con la construcción de EMIR para el Gran Telescopio Canarias (GTC). Muchos de los elementos testeados en CAIN se usaron posteriormente para EMIR: modos de lectura, controlador de la electrónica, etc.

Por supuesto, CAIN no sólo sirvió para mejorar la experiencia del IAC en la construcción de instrumentación infrarroja, sino que dotó a los astrónomos de una importante herramienta para estudiar numerosos objetos celestes a estas longitudes de onda inaccesibles antes desde el Observatorio del Teide. Muchos artículos científicos, tesinas y tesis doctorales vieron la luz gracias a CAIN.

CAIN fue decomisionado en enero de 2019 como CAIN-III después de una larga vida produciendo datos científicos.

**Tesina de NIEVES CASTRO RODRÍGUEZ**  
Director: Francisco Garzón López. Universidad de La Laguna, 2000

# La colisión del Shoemaker-Levy con Júpiter

El seguimiento de los impactos en Júpiter del cometa P/Shoemaker-Levy 9 (ya fragmentado) significó el mayor esfuerzo observacional coordinado llevado a cabo hasta entonces en los Observatorios de Canarias. La mayor parte de los datos obtenidos a lo largo de la colisión se lograron con instrumentación infrarroja diseñada y desarrollada en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Fueron precisamente los telescopios de Canarias, tras las imágenes obtenidas con esa instrumentación, los primeros en notificar la detección del impacto, según la Unión Astronómica Internacional.

En 1994, tuvo lugar un fenómeno extraordinario: el choque de un cometa con uno de los planetas del Sistema Solar. Este cometa, con un nombre complejo -el P/Shoemaker-Levy 9-, alcanzaba en 1994 mayor popularidad que el propio Halley, hasta entonces “el cometa” por antonomasia. Fue descubierto, el 24 de marzo de 1993, por tres conocidos buscadores de cometas como su nombre indica: el matrimonio Shoemaker (Eugene y Carolyn) y David Levy. El impacto, que fue predicho con un año de antelación y con gran exactitud, produjo uno de los mayores esfuerzos coordinados de observación de la historia de la Astronomía.

Los Observatorios de Canarias, en colaboración con un grupo del Servicio de Astrofísica de Saclay (Francia) y del Observatorio de Estocolmo (Suecia), fueron los primeros en detectar, el sábado 16 de julio, a las 20:18 Tiempo Universal (21:18 hora canaria), el impacto del cometa P/Shoemaker-Levy 9 en Júpiter. A esa hora se detectó una mancha en el planeta que se correspondió en posición al impacto del primer fragmento del cometa (el núcleo A=21). Esa detección se realizó inicialmente en longitudes de onda del infrarrojo y, posteriormente, en el visible. El Central Bureau for Astronomical Telegrams de la Unión Astronómica Internacional (IAU) reconoció estas observaciones como el primer informe mundial recibido sobre el impacto.

Las observaciones en el rango infrarrojo fueron realizadas por astrónomos del IAC, de forma casi simultánea, con dos cámaras infrarrojas instaladas una en el Telescopio Carlos Sánchez (TCS), de 1,52 m de diámetro, del Observatorio del Teide (Tenerife), y otra en el Nordic Optical Telescope (NOT), del Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma). En el primero se utilizó una cámara infrarroja de 256x256 de HgCaTe, diseñada y desarrollada en el IAC y que se encontraba en fase de pruebas (*commissioning*); con ella se obtuvieron imágenes en 2,167 micras. En el segundo, se obtuvieron imágenes en 10 micras.

Tras quedar atrapado en la órbita de Júpiter y romperse en múltiples fragmentos, el cometa no sólo perdió la P/ que se antepone a su nombre indicando su carácter periódico. También perdió su vida, estrellándose contra el planeta. Aparte de la belleza de su visión, hoy sabemos que tanto el origen de la vida como la desaparición de algunas especies, entre las que se encuentran los dinosaurios, pudo haberse originado tras impactos de cometas sobre la Tierra. El choque del Shoemaker-Levy con Júpiter demostró que estas colisiones son improbables, pero no imposibles.

## EL “COMETAZO”

*En la década de los noventa nos visitaron varios cometas, algunos de ellos de gran interés científico y periodístico. Precedido de cometas como el Halley (1986), el Austin (1990) y el Levy (1990), llegaba a los medios de comunicación, en julio de 1994, el cometa P/Shoemaker-Levy 9. En esta ocasión, el cometa interesaba no por su brillantez intrínseca, sino porque iba a ofrecer un espectáculo sin igual: una colisión cósmica. Para definirlo, la prensa acuñó un término muy gráfico, “Empieza el gran ‘cometazo’” (El País, 16/7/94), aunque también se utilizaron titulares como “Verbena cósmica en Júpiter” (El Periódico, 17/7/94), “Odisea en el espacio: impacto en Júpiter” (Diario 16, 16/7/94) o “El choque del siglo” (Canarias 7, 19/7/94).*

*Fue un año de noticias sobre el evento, dado que la colisión fue pronosticada con mucha antelación: el 8 de junio de 1993 ya se anunciaba en la prensa: “Los astrónomos prevén un espectacular choque de cometas con Júpiter en 1994” (El País, 8/6/93). También se anunció: “Júpiter será la estrella de la primera colisión interplanetaria televisada” (El Periódico de Zaragoza, 14/7/94). A medida que se acercaba el momento, se sucedían las especulaciones sobre la magnitud de la colisión. Después seguimos, día a día, los impactos de cada uno de los fragmentos del cometa: “Espectacular impacto del fragmento A contra Júpiter” (La Vanguardia, 18/7/94), registrado por los telescopios canarios, que fueron los primeros en informar de la colisión: “Júpiter encajó la mayor ‘pedrada’” (La Voz de Asturias, 21/7/94), “El cometa ‘agujerea’ Júpiter” (El País, 18/7/94), “Júpiter tiene un cráter como la mitad de la Tierra” (Diario 16, 18/7/94)... Esta colisión reavivó el debate sobre la necesidad de plantearse cómo evitar un acontecimiento similar en nuestro planeta, y no sin razón teniendo en cuenta que, como titulaba otro periódico, “El mayor impacto del cometa SL-9 superó en potencia el arsenal nuclear de la Tierra” (Abc, 20/7/94).*

*En periodismo se valoran las noticias por su cercanía. Lo ocurrido en tu propia ciudad parece interesar más que si tuviéramos lugar a miles de kilómetros. Por la misma razón, a la escala del Universo, la proximidad de esta colisión en nuestro sistema solar, histórica y sin precedentes, despertó en mucha gente un sentimiento de nacionalidad cósmica y de conciencia planetaria que hasta entonces ignoraba.*

CARMEN DEL PUERTO,  
periodista y exjefa de la UC3 del IAC

Imagen del cometa P/Shoemaker-Levy 9 tomada el 17 de mayo de 1994 con el telescopio espacial Hubble. © NASA, ESA, and H. Weaver and E. Smith (STScI)

## TESTIGOS DE UN IMPACTO

“La expectación, la emoción, la tensión de eventos previsible, de sucesos que sí o sí van a tener lugar puntualmente, que no se van a repetir, que hay que medir y que no sabes si vas a poder hacerlo, si funcionará todo bien, si fallará el detector o cualquier otra cosa... Es lo que sucede con ocultaciones lunares y, especialmente, lo que pasó con el impacto del Shoemaker-Levy con Júpiter” Así lo recuerda el astrofísico **Jesús Jiménez Fuensalida**, quien era entonces responsable de los telescopios nocturnos del Observatorio del Teide y uno de los coordinadores de la observación. “Además -añade-, significativos fueron los logros observacionales obtenidos de un evento tan singular, con instrumentación diseñada y desarrollada en el IAC, y que, de esta forma, se hubiera contribuido a elevar las perspectivas y los medios de nuestra comunidad.”

Muchos fueron los nervios justo antes del evento. “Un fallo mecánico con CAIN nos tuvo a **Javier Fuentes** y a mí -recuerda el astrofísico e ingeniero óptico **Roberto López**-trabajando hasta las 2h de la madrugada del 16 de mayo para dejarlo montado y que se pudiera enfriar y probar la noche siguiente antes del impacto del cometa.”

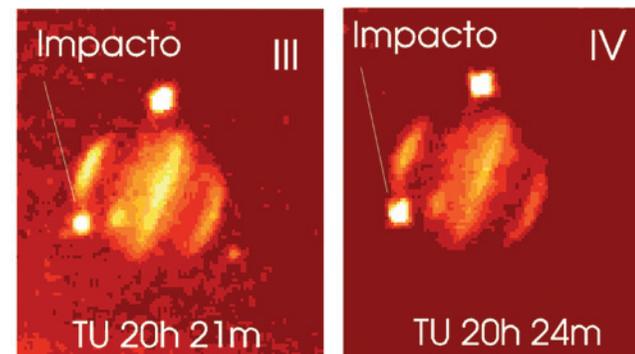
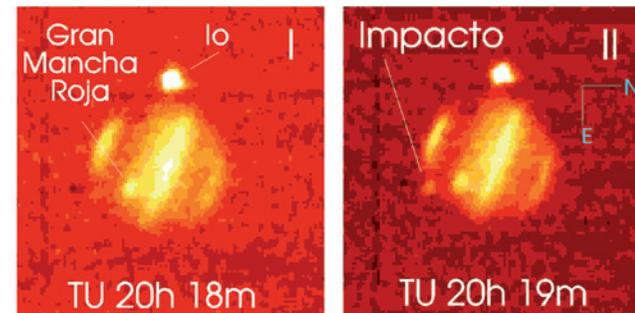
**Miquel Serra Ricart**, administrador del Observatorio del Teide, recuerda: “Fuimos los primeros testigos de los efectos de la entrada del fragmento A en la atmósfera joviana. Pero saber que nosotros habíamos detectado el choque no era suficiente, tenía que saberlo todo el mundo. Y, asombrosamente, nos pusimos todos de acuerdo y manos a la obra. Necesitábamos reducir y componer, en menos de un par de horas, las imágenes obtenidas en el TCS. No era tarea fácil, todavía recuerdo cuando Jesús Jiménez se dirigió a **Peter Hammersley** para preguntarle cuánto tardaría en reducir las imágenes del impacto. “Pues de forma rápida, sobre unas tres horas”. Y Jesús contestó: “Bien, Peter, tienes que hacerlo en una hora”. Y lo hizo. Yo creo que en estas frases queda resumido el trabajo de esos días, a contrarreloj y en el que se implicó todo el personal del IAC, no sólo astrofísicos e ingenieros, sino también el equipo de Observadores, Mantenimiento, Centro de Cálculo, Gabinete de Dirección y Administración.”

La detección del impacto se realizó inicialmente en el infrarrojo y, posteriormente, en el visible con el telescopio IAC-80, en el Observatorio del Teide, donde se encontraban los astrofísicos **José Miguel Rodríguez Espinosa** y **Álex Oscoz**.

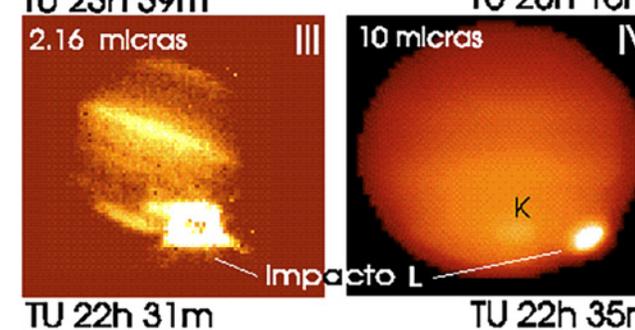
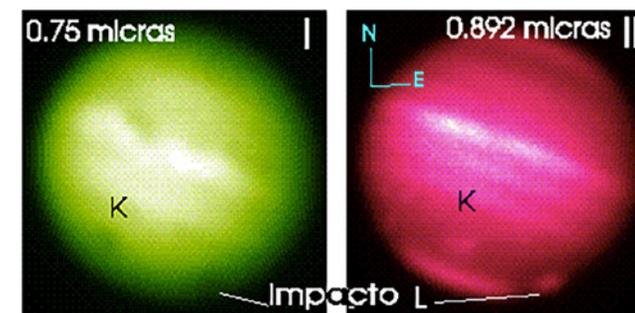
El astrofísico **Juan Antonio Belmonte**, quien se encontraba siguiendo el impacto en el NOT, en el Observatorio del Roque de los Muchachos, recuerda las llamadas cruzadas de alegría con Jesús Jiménez. Son ese tipo de recuerdos los que a uno le hace sentirse orgulloso de ser astrónomo. La satisfacción de todos nosotros era manifiesta, especialmente en Tenerife, puesto que la cámara instalada en el TCS había sido completamente diseñada y construida en el IAC, y éste fue su primer trabajo de carácter científico. El equipo hispano-francés, con el que me encontraba en el NOT, tampoco disimulaba su fascinación con los resultados y disfrutaba contándoselo todo a unos corresponsales del Canal 4 de la Televisión Británica, a través de cuyas imágenes la noticia fue recogida en Australia.”

La ingeniera **Ángeles Pérez de Taoro** se encontraba en el Museo de la Ciencia y el Cosmos: “Desde el Museo y en conexión con el Observatorio del Teide, el numeroso público asistente pudo ver en directo el impacto en Júpiter del mayor de los fragmentos del cometa, tanto en la pantalla del salón de actos como en los demás monitores colocados a tal fin en la terraza y en las escaleras del Museo. Fue el 20 de julio, coincidiendo con el 25º aniversario de la llegada a la Luna. Los astrofísicos **Ignacio García de la Rosa**, **Antonio Mampaso** y **Manuel Vázquez** comentaron el evento. El público se fue a las once de la noche después de ¡cuatro horas!, la mayoría de pie y muchos a la intemperie en la terraza del Museo.”

**Mark Kidger**, experto en cometas, apuntaba en su valoración posterior: “En las semanas previas al comienzo de la colisión, pocos fueron los astrónomos que se atrevieron a predecir que se podría siquiera detectar el impacto. Sin embargo, lo que nadie esperaba era que las nubes procedentes de las explosiones siguieran viéndose semanas y hasta meses después. Y nos llevará muchos años encontrar una buena explicación a todo lo observado.”



Impacto en Júpiter del fragmento “A” del cometa P/Shoemaker-Levy 9. Imagen infrarroja (2,166 micras) tomada la noche del 16 de julio de 1994 con el telescopio Carlos Sánchez, en el Observatorio del Teide (Tenerife). © IAC.



Impacto en Júpiter del fragmento “L” del cometa P/Shoemaker-Levy 9. Imágenes tomadas la noche del 19 de julio de 1994 con los telescopios IAC-80 (imágenes I y II), TCS (imagen III) y NOT (imagen IV). © IAC/NOT

# Observaciones en el infrarrojo cercano en el ING

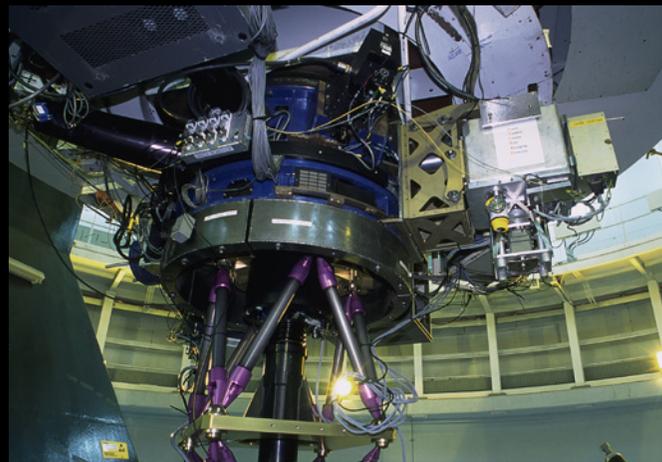
La posibilidad de la utilización de instrumentos privados e instrumentos para uso común en los telescopios del Isaac Newton Group of Telescopes (ING) del Observatorio del Roque de los Muchachos, en La Palma, ha permitido un desarrollo gradual de la astronomía infrarroja desde mediados de los años ochenta: desde el uso de pequeños detectores y técnicas en fase de pruebas hasta llegar a alcanzar un nivel de producción científica estable y de calidad (más de 300 artículos publicados en revistas con arbitraje científico desde los comienzos). Además, destaca la dificultad añadida derivada de la combinación de la observación infrarroja con técnicas de alta resolución, como la óptica adaptativa, y con modos complejos como la polarimetría, la espectroscopía multiobjeto o la coronografía.

El primer instrumento del que tenemos constancia que obtuvo datos más allá del rango óptico es el *Leicester Indium Antimonide Photometer (LIAP)*, montado en el telescopio Isaac Newton (INT) a mediados de los ochenta. Se trataba de un fotómetro capaz de obtener lecturas cada 20 milisegundos y, con el uso de la tecnología de la época, almacenar hasta 80 segundos de lecturas. Esta configuración se utilizó el 11 de septiembre de 1986 para resolver las fuentes infrarrojas visibles en la banda K cercanas al centro de la Vía Láctea aprovechando para ello la ocultación lunar del centro galáctico que se produjo esa noche (Adams et al., 1986).

Tras estas primeras observaciones, el telescopio William Herschel (WHT) toma el relevo. En julio de 1991 ve la primera luz el *Infrared Imaging Fabry-Perot Camera (FAST)*, diseñado y construido por el Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, Garching (Krabbe et al., 1993). Era una cámara tipo Fabry-Perot que permitía la obtención de imágenes en un determinado rango espectral y con un detector de InSb de 62x58 píxeles. Utilizando FAST, en 1995 se publicaron nuevos datos sobre los objetos estelares presentes en el centro galáctico y se estimó la masa del agujero negro central (Krabbe et al., 1995).

En diciembre de 1993 se utilizó por primera vez la *Arcetri Near-Infrared Camera (ARNICA)*, construida por el Arcetri Observatory, Florencia. Se trataba del primer uso de un detector del tipo HgCdTe NICMOS-3 de 256x256 píxeles (Lisi et al., 1996) en el ING, y su utilización sirvió para la caracterización del instrumento de cara a la observación astronómica.

En febrero de 1995 vio la primera luz **WHIRCAM**, una cámara de imagen infrarroja diseñada y construida por la Universidad de Oxford y el Royal Observatory Edinburgh (Hughes et al., 1996). Dotada con un detector de Santa Barbara Research Corporation de InSb de 256x256 píxeles, estuvo instalada en la plataforma *Groundbased High Resolution Imaging Laboratory (GHRIL)*. WHIRCAM no solo proporcionó imágenes infrarrojas en un telescopio de 4 m, sino que también se utilizó más adelante en combinación con algunos de los instrumentos precursores de la óptica adaptativa, como **MARTINI-III** y **ELECTRA**. WHIRCAM fue la primera cámara infrarroja de uso común en el ING y estuvo operativa hasta 1999, siendo reemplazada posteriormente por **INGRID**. Observaciones realizadas con



INGRID (en el extremo superior derecho), instrumento montado en un puerto auxiliar del foco Cassegrain en el WHT. © Rainer Girnstein

WHIRCAM en agosto de 1997 en la banda H permitieron confirmar la presencia de una de las lentes gravitatorias galácticas cuádrupolares de menor tamaño conocida hasta la fecha, con una separación máxima de 0,42 segundos de arco (Marlow et al., 1999).

El *Cambridge Infrared Survey Instrument (CIRSI)* entró en funcionamiento como instrumento privado en enero de 1998. Desarrollado en el Instituto de Astronomía de Cambridge, CIRSI era una cámara de gran campo que utilizaba un mosaico de 4 detectores Rockwell HgCdTe de 1024x1024 píxeles, convirtiéndose así en la cámara infrarroja con mayor campo de visión en el mundo en ese momento. Con cuatro apuntados cercanos para rellenar las separaciones entre los detectores, podía cubrir 0,5x0,5 grados en el cielo. Estuvo en funcionamiento en los focos primario del WHT y del INT, y en este último realizó el *CIRSI-INT Survey* (Sharp et al., 2002).

Diseñado y construido por el Royal Greenwich Observatory (RGO), el ING, el Astronomy Technology Centre y el IAC, el *Isaac Newton Group Red Imaging Device (INGRID)* (Packham et al., 2003) vio su primera luz en marzo del año 2000. INGRID se convirtió en la nueva cámara infrarroja para uso común en el WHT instalada en el foco Cassegrain, hasta que en marzo de 2003 se trasladó definitivamente al nuevo laboratorio Nasmyth del WHT, GRACE, para formar parte del programa permanente de óptica adaptativa. INGRID poseía un único detector Hawaii HgCdTe de 1024x1024 píxeles y fue el último instrumento en el que participó el RGO antes de su cierre definitivo. Con INGRID en el Cassegrain se descubrió en 2002 el objeto planetario de menor masa observado hasta la fecha, aislado (no ligado gravitatoriamente) y situado fuera del Sistema Solar. El objeto se encuentra en el cúmulo abierto Sigma Orionis y el descubrimiento sugiere que podría existir una población importante de estos objetos aún por descubrir (Zapatero et al., 2002).

En combinación con el instrumento de óptica adaptativa NAOMI, INGRID se utilizó para hacer imagen, y con NAOMI+OSCA, coronografía. La utilización de óptica adaptativa permite la obtención de imágenes infrarrojas de alta resolución espacial, apoyadas desde mayo de 2007 con la utilización de GLAS, un láser que creaba estrellas guía para NAOMI a baja altura. Utilizando NAOMI+INGRID, cuando aún se encontraba en GHRIL, se obtuvieron las primeras imágenes utilizando óptica adaptativa de un asteroide cercano a la Tierra, el NEA 2002 NY40, en septiembre de 2002 (ING, 2002).

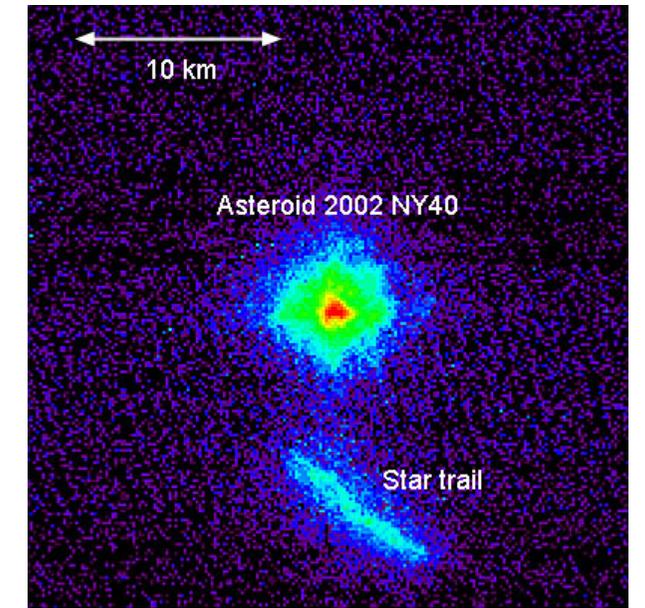


Imagen en la banda H obtenida por NAOMI+INGRID en la noche del 17 de agosto de 2002 del asteroide cercano a la Tierra NEA 2002 NY40. En ese momento 2002 NY40 se encontraba a dos veces la distancia entre la Tierra y la Luna, y moviéndose en el cielo a una velocidad equivalente a recorrer el diámetro celeste de la Luna en 6 minutos, aproximadamente. A pesar de las dificultades técnicas, se obtuvo una imagen con una resolución de 0,11 segundos de arco, lo cual permitió poner un límite máximo al tamaño del asteroide: sólo 400 metros. © ING NAOMI Team

En diciembre de 2003, el Instituto de Astronomía de la Universidad de Cambridge instaló por primera vez el *Cambridge Infrared Panoramic Survey Spectrograph (CIRPASS)*, un espectrógrafo de fibras ópticas capaz de realizar espectroscopía de campo integral con 490 fibras, y espectroscopía multiobjeto, con 150 fibras conectadas a agujeros perforados en una placa de bronce que cubre un campo de visión de unos 15 minutos de arco. Instalado en el Cassegrain, CIRPASS proporcionó espectros de resolución 3.000 en un detector Hawaii HgCdTe de 2048x2048 píxeles (Bunker et al., 2005). Demostró por primera vez el uso eficiente de la espectroscopía infrarroja multiobjeto para el estudio de galaxias a alto corrimiento al rojo, dando a conocer la tasa de formación estelar en galaxias a corrimiento al rojo uno en el campo profundo norte del HST (Doherty et al., 2006).

Fruto de un acuerdo entre el ING y el IAC, en febrero de 2003 ve la primera luz el *Long Slit Intermediate-Resolution Infrared Spectrograph (LIRIS)*, construido por el IAC (Acosta-Pulido et al., 2002), que pasa a convertirse en el nuevo instrumento infrarrojo de uso común en el foco Cassegrain del WHT. LIRIS es un instrumento capaz de proporcionar imagen, espectroscopía de rendija y multiobjeto (utilizando rendijas perforadas en una placa),

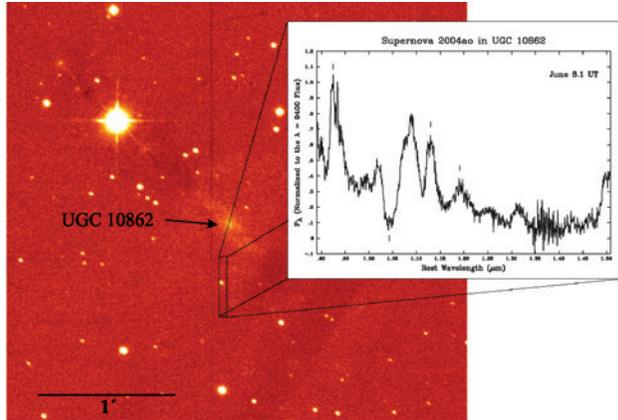
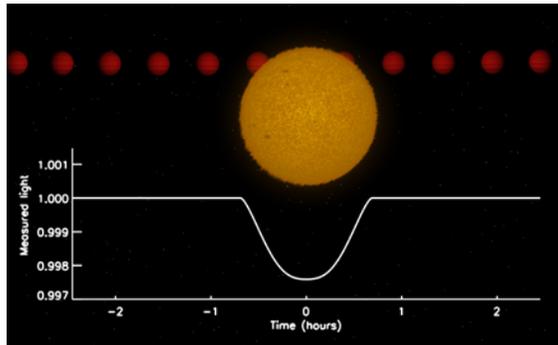


Imagen en la banda J (izquierda) y espectro NIR (derecha) de SN 2004ao, obtenidos el 8 de junio de 2004 (t~+90 días) con LIRIS en el WHT. El núcleo de la galaxia anfitriona UGC10862 es visible al noroeste de la supernova. La posición de la rendija se ha marcado con un recuadro que encierra la supernova. El norte está arriba y el este, a la izquierda. © Gómez, G. López, R., Acosta-Pulido, J.A. Manchado, A. (2005) "LIRIS Observations of SN 2004ao", *ING Newsl.*, 9, 14.



Este gráfico muestra los efectos de un eclipse secundario: cuando el planeta extrasolar se esconde tras su estrella, el brillo del sistema cae permitiendo aislar la luz de la estrella. Este efecto permitió la observación directa de TrES-3b, un planeta extrasolar del tipo "hot Jupiter", por primera vez. © Joint Astronomy Centre

#### REFERENCIAS:

- Acosta-Pulido, J.; Ballesteros, E.; Barreto, M. (Project Manager), Correa, S.; Delgado, J.M.; Domínguez-Tagle, C.; Hernández, E.; López, R.; Manchado, A. (IP); Manescau, A.; Moreno, H.; Prada, F.; Redondo, P.; Sánchez, V.; y Tenegi, F. (2002). "LIRIS: A Long-Slit Intermediate Resolution Infrared Spectrograph for the WHT". *ING Newsl.*, 6, 22.
- Adams, D.J.; Becklin, E.E.; Jameson, R.F.; Longmore, A.J.; Sandqvist, A.; y Valentijn, E. (1988). "Lunar occultation of the Galactic center at 2.2 microns". *ApJ*, 327, L65.
- Bunker, A.; Sharp, R.; Doherty, M.; y Parry, I. (2005). "CIRPASS on the William Herschel Telescope: Measuring the Global Star Formation Rate Over Most of History". *ING Newsl.*, 10, 15.
- Doherty et al., (2006). "The star formation rate at redshift one: Halfa spectroscopy with CIRPASS". *MNRAS*, 370, 331.
- García Muñoz, A.; Zapatero Osorio, M.R.; Barrena, R.; Montañés-Rodríguez, P.; Martín, E.L.; y Pallé, E. (2012). "Glancing views of the Earth: from a lunar eclipse to an exoplanetary transit". *ApJ*, 755, 103.
- Gendron, E.; Vidal, F.; Brangier, M.; Morris, T.; Hubert, Z.; Basden, A.; Rousset, G.; Myers, R.; Chemla, F.; Longmore, A.; Butterley, T.; Dipper, N.; Dunlop, C.; Geng, D.; Gratadour, D.; Henry, D.; Laporte, P.; Looker, N.; Perret, D.; Sevin, A.; Talbot, G.; y Younger, E. (2010). "MOAO First On-sky Demonstration With CANARY". *A&A*, 529, L2.
- Hughes, S.; Roche, P.; y Dhillon, V. (1996). "WHIRCAM User Guide".
- ING press release, "A Sharper Look at Near Earth Asteroid 2002 NY40", 4 de septiembre 2002.
- Krabbe, A.; Rotaciuc, V.; Storey, J.W.V.; Cameron, M.; Blietz, M.; Drapatz, S.; Hofmann, R.; Samann, G.; y Genzel, R. (1993). "FAST: A near-infrared imaging Fabry-Perot spectrometer". *PASP*, 105, 1472.
- Krabbe, A.; Genzel, R.; Eckart, A.; Najarro, F.; Lutz, D.; y Cameron, M. (1995). "The Nuclear Cluster of the Milky Way: Star Formation and Velocity Dispersion in the Central 0.5 Parsec". *ApJL*, 447, pL95.
- Lisi, F.; Baffa, C.; Biliotti, V.; Bonaccini, D.; del Vecchio, C.; Gennari, S. (1996). "ARNICA, the Arcetri Near-Infrared Camera". *PASP*, 108, 364.
- Marlow, D.R.; Myers, S.T.; Rusin, D.; Jackson, N.; Browne, I.W.A.; Wilkinson, P.N.; Muxlow, T.; Fassnacht, C.D.; Lubin, L.; Kundic, T.; Blandford, R.D.; Pearson, T.J.; Readhead, A.C.S.; Koopmans, L.; y de Bruyn, A.G. (1999). "Class B1555+375: A new four-image gravitational lens system". *AJ*, 118, 654.
- De Mooij, E.J.W.; y Snellen, I.A.G. (2009). "Ground-based K-band detection of thermal emission from the exoplanet TrES-3b". *A&A*, 493, L35.
- Myers, R.M.; Hubert, Z.; Morris, T.J.; Gendron, E.; Dipper, N.A.; Kellerer, A.; Goodsell, S.J.; Rousset, G.; Younger, E.; Marteaud, M.; Basden, A.G.; Chemla, F.; Guzmán, D.; Fusco, T.; Geng, D.; Le Roux, B.; Harrison, M.A.; Longmore, A.J.; Young, L.K.; Vidal, F.; y Greenaway, A.H. (2008). "CANARY: the on-sky NGS/LGS MOAO demonstrator for EAGLE". *Proc. SPIE 7015, Adaptive Optics Systems*, 70150E.
- Packham, C., et al. (2003). "INGRID: A near-infrared camera for the William Herschel Telescope". *MNRAS*, 345, 395.
- Zapatero Osorio, M.R.; Béjar, V.J.S.; Martín, E.L.; Rebolo, R.; Barrado y Navascués, D.; Mundt, R.; Eisloffel, J.; y Caballero, J.A. (2002). "A Methane, Isolated, Planetary-Mass Object in Orion". *ApJ*, 578, 536.

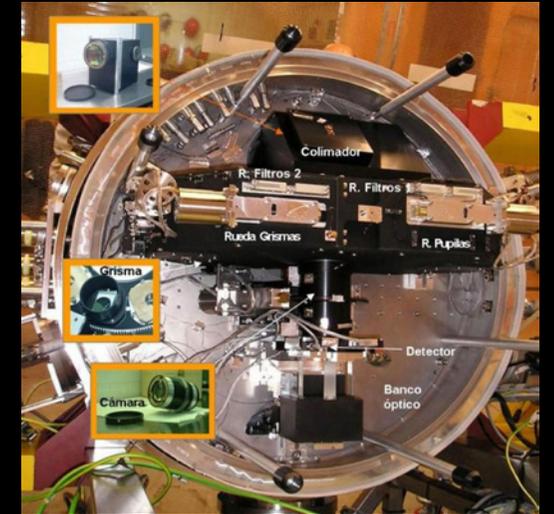
coronografía y polarimetría espectroscópica y de imagen. (Más información, en siguientes páginas). Uno de los primeros resultados científicos obtenidos por LIRIS, que además demostraba su importante capacidad para la observación, fue el espectro obtenido de la supernova SN2004ao (Gómez et al., 2009), uno de los pocos espectros infrarrojos de una supernova de colapso gravitatorio publicados hasta la fecha. Desde entonces, LIRIS ha producido una gran cantidad de resultados científicos, pudiéndose destacar la primera detección directa de un planeta extrasolar utilizando el método del eclipse secundario (de Mooij y Snellen, 2009) o la obtención del espectro de transmisión de la atmósfera de la Tierra durante un eclipse lunar (García Muñoz et al., 2012).

Finalmente, en septiembre de 2010 comenzó a utilizarse **CANARY**, un instrumento que pretende emular un canal del instrumento EAGLE del Telescopio Extremadamente Grande (ELT), que utilizará óptica adaptativa multiconjugada (MOAO) con estrellas artificiales y naturales para proporcionar imágenes corregidas por óptica adaptativa en un campo de visión amplio. Es fruto de una colaboración entre Durham University, Observatoire de Paris, European Southern Observatory, INAF - Osservatorio Astronomico di Roma, IAC, UK Astronomy Technology Centre y el ING. CANARY se utiliza simultáneamente en combinación con un láser de sodio proyectado desde el exterior del WHT y observado por un Sodium Profiler desde el INT. Con esta configuración, CANARY se convierte en el único prototipo capaz de estudiar los efectos de una elongación extrema de una estrella proyectada por láser en el rendimiento de la óptica adaptativa, estudio que es fundamental para el desarrollo de la instrumentación de óptica adaptativa del ELT. No en vano, CANARY demostró por primera vez la viabilidad de la técnica MOAO (*Multi-Objects Adaptive Optics*) para la observación astronómica en 2010 obteniendo imágenes corregidas en el infrarrojo cercano (Gendron et al., 2011).

JAVIER MÉNDEZ ÁLVAREZ,  
astrofísico y PR Officer del ING  
MARC BALCELLS,  
director del ING

# LIRIS: 20 años de espectroscopía infrarroja en un gran telescopio

Un equipo interdisciplinar formado por investigadores, ingenieros y técnicos del IAC realizó con éxito, en febrero de 2003, las primeras pruebas del espectrógrafo LIRIS (*Long-Slit Intermediate Resolution Infrared Spectrograph*), construido en el IAC e instalado en el telescopio William Herschel (WHT), del Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma). LIRIS es un instrumento que permite obtener imágenes y espectros de más de un objeto simultáneamente, todo ello en el infrarrojo. Concretamente, puede observar hasta 24 fuentes de un mismo campo a la vez. Existen otros instrumentos similares, pero en el momento de su construcción, LIRIS era el único de estas características situado en el hemisferio Norte. Con este instrumento, el IAC demostró su capacidad para desarrollar instrumentación astronómica competitiva. Veinte años después, LIRIS sigue siendo uno de los instrumentos de uso común en el WHT para la comunidad científica.



Banco óptico de LIRIS © IAC

incluyó también en LIRIS un modo imagen que, a su vez, lo hacía un instrumento más versátil.

Disponer de diferentes modos de observación garantizaba que se podría utilizar en una amplia gama de programas científicos, desde el Sistema Solar (por ejemplo, el estudio de la atmósfera rica en metano de Titán), búsqueda de planetas extrasolares, regiones de formación estelar, últimas fases de la evolución estelar (por ejemplo, las estrellas en la Rama Asintótica de Gigantes), galaxias lejanas con formación estelar, galaxias con núcleos activos y cosmología.

La filosofía principal del proyecto fue garantizar el éxito dentro de una escala de tiempo y presupuesto razonable a pesar de las dificultades. Para ello se partió de un diseño óptico sencillo, basado en lentes esféricas, garantizándose que se podrían fabricar e integrar y que proporcionarían una muy buena calidad de imagen y una alta eficiencia.

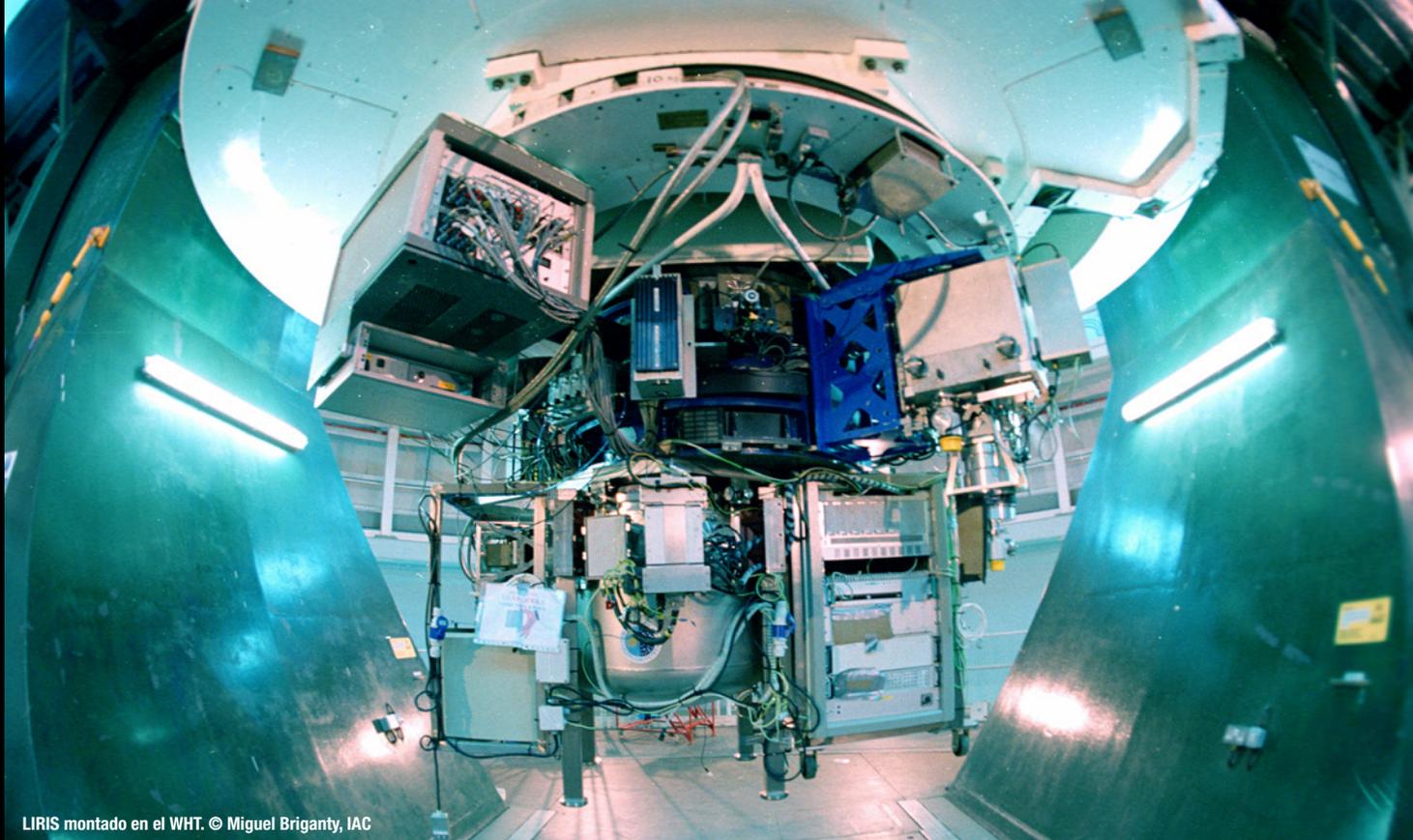
#### DESCRIPCIÓN GENERAL

LIRIS es una cámara y espectrógrafo para el rango infrarrojo cercano. Los modos de operación de LIRIS son: imagen, espectroscopía multiobjetos, coronografía y polarimetría. Opera en el foco Cassegrain del WHT como instrumento de uso común. Utiliza un detector de gran formato (Hawaii 1024x1024 pixels) sensible en el rango de 0,9 a 2,4 mm, cubre las bandas

A finales de los años 90 aparecieron detectores infrarrojos de gran formato, 1024x1024 píxeles, con bajo ruido de lectura y baja corriente de oscuridad. Este hecho, junto con la inexistencia, en aquella época, de instrumentación infrarroja competitiva en el Observatorio del Roque de los Muchachos, hizo que el IAC decidiese construir un espectrógrafo infrarrojo para el telescopio de mayor diámetro en aquel momento, el telescopio William Herschel (WHT), de 4,2 m, del Grupo de Telescopios Isaac Newton (ING).

A pesar de que sólo había en el mundo tres espectrógrafos infrarrojos similares a LIRIS al comienzo del proyecto, marzo de 1998, se veía que diferentes grupos construirían instrumentos similares, por lo que se decidió dotar a LIRIS de capacidades únicas para hacer de él un instrumento muy competitivo. Para ello se incorporaron los modos de coronografía (que permitiría poder ver planetas gigantes orbitando en torno a estrellas), polarimetría y espectroscopía multiobjeto. En este último modo se podría obtener el espectro de hasta 24 objetos simultáneamente con el consecuente ahorro de tiempo, lo que lo hacía más competitivo que otros instrumentos similares en telescopios de 8 y 10 metros.

Uno de los grandes problemas que plantea observar en el infrarrojo es que la emisión del cielo puede ser varios órdenes de magnitud superior al flujo del objeto que queremos observar. Esto hace que muchas veces sea muy difícil poder situar el objeto en la rendija, por lo que para facilitar la adquisición de los objetos se



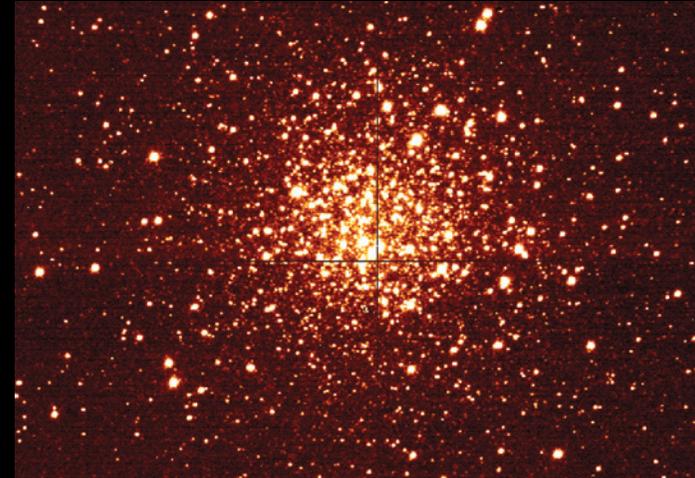
LIRIS montado en el WHT. © Miguel Bríngant, IAC

fotométricas J, H y K y proporciona un campo de 4,2'x4,2' (0,25"/píxel). Su sistema óptico está basado en el diseño clásico colimador/cámara utilizando grismas como elementos de dispersión para alcanzar resoluciones espectrales en el rango de 1.000 a 3.000. Las condiciones de operación del detector y de la óptica obligan a la ubicación de los mismos en el interior de un tanque que garantice las condiciones criogénicas requeridas (ej. temperatura del detector 70K). LIRIS está dotado de dos sistemas de enfriamiento, un pre-enfriamiento con nitrógeno líquido y un sistema de enfriamiento basado en un ciclo cerrado que permite bajar a las temperaturas requeridas. En el interior del tanque se encuentra la rueda de rendijas (60 cm de diámetro) con 16 posiciones, que permiten situar rendijas (0,65", 0,75", 1" y 5" x 4.2'), máscaras coronográficas y máscaras multirrendija en el plano focal del telescopio. Esta rueda va ubicada sobre el banco óptico, elemento soporte de diferentes sistemas y donde se encuentra el tanque de nitrógeno para el pre-enfriamiento. En la otra cara del banco óptico (trasera) se encuentran: el colimador, que consta de 2 lentes a la entrada, un espejo a 45° y una lente a la salida; el bloque de ruedas centrales formado de 4 ruedas: dos de filtros, que permiten instalar un máximo de 22 filtros fotométricos y de línea, una para pupilas y otra con 10 posiciones para montar los grismas; y la cámara de imagen, ubicada en una rueda que permite colocar además una cámara de reimaginación para coronografía.

El equipo de LIRIS adquirió una experiencia muy valiosa en el uso de estos sistemas utilizada en posteriores instrumentos criogénicos del IAC. Con el ING se estableció un acuerdo para desarrollar de forma conjunta el sistema de control del detector y el software de control de mecanismos para los dos instrumentos infrarrojos del WHT (LIRIS del IAC e INGRID del ING).

#### PRIMERAS PRUEBAS

En febrero de 2003 se llevaron a cabo las primeras pruebas (*commissioning*) de LIRIS en el WHT, con el detector de ingeniería. Se realizaron durante cuatro noches, de las cuales tres y media fueron fotométricas y en dos de ellas la calidad de imagen fue muy buena (*seeing* en Ks de 0",5). La calidad de imagen se midió en el cúmulo M5 en la banda J donde la FWHM fue de 0",5 con variaciones de  $\pm 0",1$  a lo largo de todo el campo. Se midieron las magnitudes límite, brillo de cielo y eficiencia (óptica + detector), estando esta última entre las más altas dentro de los instrumentos similares. A pesar de que el WHT no es un telescopio optimizado para el infrarrojo, la emisión en la banda Ks está entre las más pequeñas obtenidas en telescopios optimizados para este rango. Esto demuestra que el WHT es perfectamente válido para trabajar en la banda Ks.



El cúmulo globular M5 en la banda J.

Uno de los requerimientos críticos fue que LIRIS no presentara grandes flexiones al moverse el telescopio, lo que haría muy difícil la correcta sustracción del cielo, que puede ser varios órdenes de magnitud superior a la del objeto. Para garantizar esto, en la fase de diseño se realizaron simulaciones por elementos finitos y durante las pruebas en telescopio se comprobó que, para LIRIS, la flexión máxima entre elevaciones de 75 y 0 grados es de 1 píxel (o 18 micras). El desplazamiento en la dirección espectral no excede 0,5 píxeles para diferencias de elevación de 45°, llegando a ser de 0,8 para una diferencia de 60°.

Durante las pruebas se observaron algunos objetos de interés astronómico, como la nebulosa planetaria NGC 2436 (nebulosa de la Bailarina) y la galaxia Seyfert NGC 4388. Uno de los resultados más importantes fue la detección de la línea de CIV (144,5 nm), en el cuásar más lejano detectado hasta ese momento (SDSS J1148+5251) con un desplazamiento al rojo o *redshift* de  $z = 6,41$ . Debido a dicho desplazamiento al rojo, la línea de CIV a 144,5 nm en el ultravioleta aparece en el rango infrarrojo a 1.070,7 nm.

En marzo de 2004 se realizó el segundo periodo de pruebas en el WHT, esta vez con el detector científico. Desde entonces, LIRIS se ha podido utilizar como instrumento de "astrónomo visitante".

Agradecimientos: A todo el personal del IAC y del ING, que contribuyeron con su profesionalidad y dedicación a que LIRIS fuera una realidad en el WHT. Equipo: A. Manchado, M. Barreto, J. Acosta Pulido, E. Ballesteros, R. Barreto, E. Cadavid, J. Carrillo, M. Charcos, S. Correa, J.M. Delgado, C. Domínguez-Tagle, O. González, E. Hernández, R. López, A. Manescau, H. Moreno, J. Olives, L. Peraza, F. Prada, P. Redondo, V. Sánchez, N. Sosa, F. Tenegi, M.J. Vidal y C. Milittello.

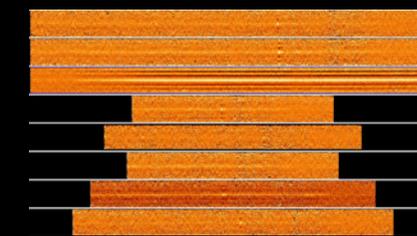
ARTURO MANCHADO, MARY BARRETO Y JOSÉ ACOSTA (IAC)  
(Información adaptada del artículo publicado en IAC Noticias, 2-2003, pp- 15-23)

## LA PRIMERA TESIS CON LIRIS

### "SONDEO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE UNA MUESTRA DE GALAXIAS CON FORMACIÓN ESTELAR A $Z \sim 1$ "

Esta tesis presenta un estudio sistemático de las propiedades de galaxias con formación estelar activa a distancias cosmológicas intermedias, es decir, cuando el Universo tenía la mitad de su edad actual. El estudio se centra en el análisis de espectros multirrendija en el infrarrojo cercano, obtenidos con LIRIS en el WHT, para una muestra representativa de galaxias en el rango de desplazamientos al rojo ( $z$ ) entre 0,8 y 1. A estos *redshifts*, algunas de las líneas más brillantes en los espectros de las galaxias, como la línea H $\alpha$  de emisión del hidrógeno ionizado, se desplazan al infrarrojo, dentro del rango espectral cubierto por LIRIS. Para las galaxias observadas se disponía de datos previos en múltiples longitudes de onda y espectros en el rango visible procedentes de los sondeos DEEP2 y AEGIS.

En primer lugar, se realizó una caracterización detallada de las propiedades individuales de las galaxias, incluyendo sus colores, masas estelares, atenuaciones por polvo, metalicidades, parámetros de ionización y luminosidades en diferentes longitudes de onda comúnmente usadas como indicadores de formación estelar.



Espectros infrarrojos (corregidos de la emisión de cielo) obtenidos con LIRIS para siete galaxias con  $z$  entre 0,8 y 1, más una estrella de referencia (tercer espectro por arriba).

Una segunda parte del estudio se centró en la determinación de la Tasa de Formación Estelar en galaxias a *redshifts* intermedios a partir de distintos indicadores, comparándolos con la luminosidad en la línea H $\alpha$  corregida de atenuación, que se considera un trazador de referencia de la actividad de formación estelar reciente. Se investigaron los posibles efectos sistemáticos que afectan a los distintos indicadores y se obtuvieron nuevas calibraciones para combinaciones de ellos.

En la última parte de la tesis se estudió la evolución con el tiempo cosmológico de algunas relaciones de escala fundamentales de las galaxias con formación estelar. Los resultados indican que muchas de estas relaciones están presentes en el Universo a  $z \sim 1$ , aunque muestran cierta evolución con el tiempo cosmológico, en el sentido de mayores atenuaciones, mayores metalicidades y menores Tasas de Formación Estelar a *redshifts* más bajos.

Tesis doctoral de NAYRA RODRÍGUEZ EUGENIO  
Directores: Arturo Manchado Torres, José Antonio Acosta Pulido  
y Francisco Prada Martínez  
Universidad de La Laguna, 2014

### ESTUDIO ESPECTROFOTOMÉTRICO EN INFRARROJO CERCANO DE UN CÚMULO ESTELAR JOVEN Y MASIVO: MASGOMAS-1

Los cartografiados infrarrojos de las últimas décadas han contribuido decisivamente a nuestra actual visión de la Vía Láctea como una máquina muy activa de formación estelar. Entre los elementos que apoyan esa visión destacan los cúmulos estelares jóvenes masivos, agrupaciones de estrellas recién nacidas con una masa total que excede las 10.000 masas solares.

Estos cúmulos, de los cuales se conocen menos de una veintena, son piezas clave en la evolución galáctica, debido a su población de estrellas masivas. Estas estrellas son responsables de ionizar el material a su alrededor y modificar el medio interestelar y el contenido químico galáctico a través de sus vientos y de su explosión final como supernovas. Además, podrían inducir la formación de otras estrellas y cúmulos estelares.

Como los cúmulos masivos son objetos jóvenes sometidos a valores de extinción considerables, deben ser observados en bandas poco afectadas por la extinción, como por ejemplo el infrarrojo cercano. El proyecto MASGOMAS (*MASSive Stars in Galactic Obscured MASSive clusterS*) tiene como objetivo descubrir, observar y caracterizar físicamente cúmulos jóvenes, masivos (varios miles de masas solares) y altamente enrojecidos, pertenecientes a nuestra galaxia.

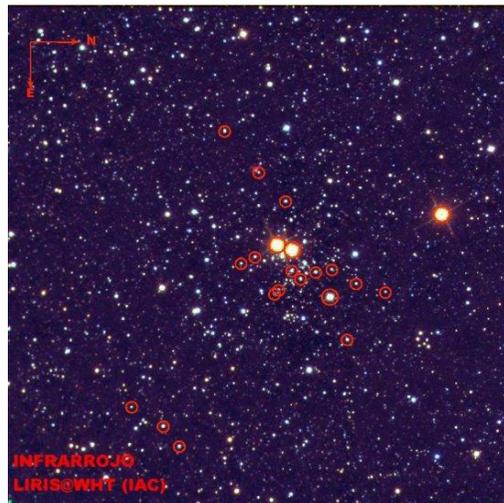


Imagen en falso color (azul=J, verde=H, rojo=KS) del cúmulo estelar masivo Masgomas-1 descubierto en 2012 con LIRIS en el WHT. Con círculos rojos se han marcado las estrellas masivas clasificadas espectroscópicamente. © LIRIS/WHT.

En la tesis doctoral de **Sebastián Ramírez Alegría**, dirigida por los astrofísicos **Artemio Herrero Davó** y **Antonio Marin Franch** y presentada en la Universidad de La Laguna en 2012, se realizó un estudio de cúmulos galácticos oscurecidos y su contenido estelar basado en la observación y caracterización espectrofotométrica en el infrarrojo cercano, usando fotometría (J, H y Ks) y espectroscopía infrarroja (H y K) obtenida con el instrumento LIRIS del Telescopio William Herschel, en el Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma). El estudio espectrofotométrico de la población estelar de los candidatos permitió estimar la distancia, extinción, masa y edad de estos cúmulos.

También se presentaron los primeros resultados de una búsqueda sistemática de candidatos a cúmulos masivos, usando filtros en el pseudocolor Qir, la magnitud Ks y el color (J-Ks), aplicados sobre la fotometría 2MASS. Este conjunto de filtros permite seleccionar estrellas candidatas a tipos espectrales OB, para posteriormente buscar sobredensidades de dichos objetos. El primer candidato encontrado con este método, Masgomas-1, fue confirmado espectroscópicamente como cúmulo y tiene una masa total de ~20.000 masas solares, siendo así el primer cúmulo masivo descubierto por el Grupo.

Posteriormente, el grupo ha encontrado otros dos cúmulos con varios miles de masas solares. Masgomas-4, el segundo cúmulo descubierto, tiene una masa de unas 2.200 masas solares y muestra un doble núcleo con claras evidencias de formación actual de estrellas masivas. El tercero de ellos, Masgomas-6, está constituido por dos diferentes cúmulos superpuestos por azar a lo largo de la línea de visión, uno a 4 kpc y el otro a unos 9,5 kpc de distancia. La superposición hace más difícil la estimación de las masas individuales, que podrían llegar a estar cercanas a las 10.000 masas solares en ambos casos.

La confirmación Masgomas-1 como cúmulo muy masivo y la presencia de una población estelar de tipo OB confirmada en Masgomas-4 y Masgomas-6, demuestran que el método de búsqueda sistemático favorece el descubrimiento de cúmulos con contenido estelar masivo, y justifican así el inicio de una futura etapa que incluiría la búsqueda automatizada de candidatos a cúmulos estelares masivos enrojecidos.

#### REFERENCIAS:

- Ramírez Alegría, S.; Marín-Franch, A.; y Herrero, A. (2012). "Discovery of a young and massive stellar cluster. Spectrophotometric near-infrared study of Masgomas-1". A&A, 541, A75.
- Ramírez Alegría, S.; Marín-Franch, A.; y Herrero, A. (2014). "Masgomas-4: Physical characterization of a double-core obscured cluster with a massive and very young stellar population". A&A, 567, A66.
- Ramírez Alegría, S.; Herrero, A.; Rübke, K.; Marín-Franch, A.; García, M.; y Borissova, J. (2018). "Identifying two groups of massive stars aligned in the l= 38° Galactic direction". A&A, 614, A116.

### LA NEBULOSA CUADRIPOLAR NGC 6881

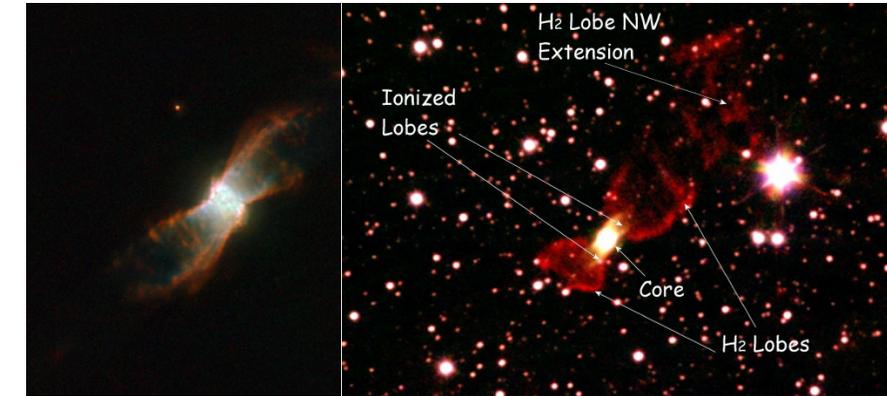
En un artículo publicado en 1785, el astrónomo William Herschel clasificó aparte un tipo de nebulosas que le parecían observacionalmente distintas del resto. Él las llamó nebulosas planetarias porque vagamente recordaban el disco verdoso de un planeta. Ahora sabemos que la naturaleza de estas bellas "especies" agrupadas como nebulosas realmente es muy variada, que no están relacionadas con discos planetarios y que no son jóvenes, sino la fase última de la evolución de una estrella. En ellas, investigadores del IAC han detectado moléculas orgánicas complejas.

Los distintos ejemplares de esta "especie" presentan un aspecto simétrico con una estrella en su centro que, al final de su vida, expulsa el material de sus capas exteriores. Esta envoltura gaseosa se extiende poco a poco y va diluyéndose, hasta confundirse con el medio interestelar. El núcleo estelar prosigue su evolución contrayéndose hasta convertirse en una enana blanca.

Un tipo de nebulosas planetarias de interés creciente y gran atractivo son las nebulosas bipolares, en las que un anillo de materia confina en dos conos la radiación y la materia expulsada de la estrella central. También, las nebulosas cuadrupolares, nebulosas planetarias que presentan dos pares de lóbulos simétricos respecto a dos ejes diferentes.

NGC 6881 es una nebulosa planetaria con forma de mariposa en la constelación del Cisne, con una estructura simétrica que podría deberse a una estrella binaria en el centro de la nebulosa. Es un ejemplo de nebulosa planetaria cuadrupolar. Este tipo de nebulosas planetarias con múltiples lóbulos bipolares empiezan a ser más comunes de lo que se pensaba y son de gran interés ya que requieren múltiples eyecciones bipolares con cambios en la dirección de eyección en muchos casos.

En el visible, NGC 6881 muestra una morfología cuadrupolar que consta de dos pares de lóbulos bipolares altamente colimados alineados en diferentes direcciones (Guerrero & Manchado, 1998). También hay evidencia de que el eje del anillo central o toro ha precedido en las últimas etapas de formación de la nebulosa planetaria (Kwok & Su, 2005). La distribución de la emisión del hidrógeno molecular es muy diferente a la del material ionizado (Guerrero et al., 2000). La emisión de hidrógeno molecular en NGC 6881 se detecta principalmente en la región ecuatorial y en lóbulos bipolares de reloj de arena anchos que están mucho más extendidos que los lóbulos bipolares ionizados. Los lóbulos bipolares H<sub>2</sub> de NGC 6881 pueden representar una eyección bipolar temprana que tuvo lugar antes de la formación de los dos



A la izquierda, imagen en el visible de la nebulosa planetaria NGC 6881. (c) ESA/Hubble & NASA. A la derecha, imagen compuesta de tres colores de NGC 6881 obtenida con LIRIS en el WHT en los filtros de H<sub>2</sub> (rojo), Br gamma (verde) y Kc (azul). La imagen está superpuesta con regiones de interés.

pares de lóbulos bipolares ionizados. Para investigar en detalle la distribución espacial del hidrógeno molecular y el material ionizado dentro de NGC 6881 y para determinar el mecanismo de excitación predominante de la emisión de H<sub>2</sub>, se obtuvieron nuevas imágenes y espectros JHK de resolución intermedia. Con las nuevas imágenes de banda estrecha obtenidas con LIRIS en el WHT se confirmaron las notables diferencias en las distribuciones espaciales de material ionizado e hidrógeno molecular dentro de esta nebulosa (Guerrero et al., 2000). Además, la mejor resolución espacial, la profundidad y la sustracción precisa del fondo en la imagen de H<sub>2</sub> y la valiosa información contenida en los espectros del IR cercano permitieron obtener una visión más detallada de la distribución y excitación del hidrógeno molecular en NGC 6881. Tanto las imágenes como los espectros muestran que las regiones más externas están dominadas por H<sub>2</sub>, mientras que la región central y los lóbulos bipolares ionizados emiten predominantemente a través de líneas de especies ionizadas.

Del análisis de las nuevas imágenes ópticas e IR cercano y espectros JHK de resolución intermedia de esta nebulosa se confirmó la asociación de los lóbulos bipolares H<sub>2</sub> con NGC 6881 y revelan que este hidrógeno ionizado es predominante. Las muy diferentes morfologías de los lóbulos bipolares ionizados y moleculares de NGC 6881 implican diferentes eyecciones bipolares que muy probablemente ocurrieron en diferentes momentos de la evolución nebulosa.

#### REFERENCIA:

- Ramos-Larios, G.; Guerrero, M.A.; y Miranda, L.F. (2007). "The H<sub>2</sub> Amazing Life of NGC 6881". Proc. Conference Asymmetrical Planetary Nebulae IV La Palma, Junio 18-22.

# El infrarrojo con el TNG

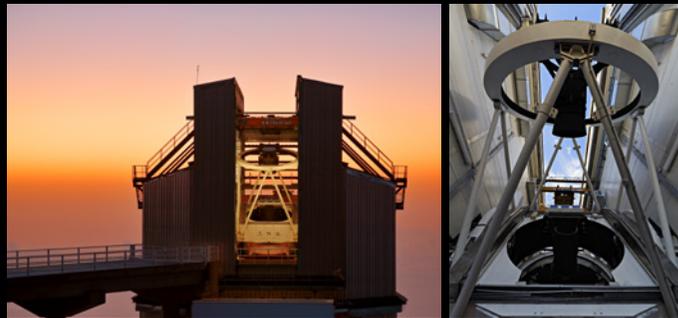
El Telescopio Nazionale Galileo (TNG), instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma) e inaugurado en 1996, es el mayor telescopio óptico e infrarrojo italiano, una versión más avanzada del Telescopio de Nueva Tecnología (NTT) del ESO (European Southern Observatory) situado en Chile.

Con una montura altazimutal y una configuración óptica Ritchey-Chrétien, el TNG tiene un espejo primario de 3,6 m. Actualmente, está equipado con cuatro instrumentos que funcionan permanentemente en sus dos focos Nasmyth y ofrecen una gran variedad de modos de observación: desde la fotometría de banda ancha hasta la espectroscopía de alta resolución, cubriendo longitudes de onda desde el visible hasta el infrarrojo cercano. En particular, dos de estos cuatro instrumentos observan en el infrarrojo (IR): NICS y GIANO B.

## NICS - NEAR INFRARED CAMERA SPECTROMETER

Instalado en 2000 en el foco Nasmyth A del telescopio, este instrumento permite obtener imágenes y espectros de baja y media resolución en el infrarrojo cercano (0,9-2,5 micras). Entre los principales objetivos científicos de NICS se encuentra el estudio de objetos fríos de nuestra galaxia que emiten, por lo tanto, en el infrarrojo: estrellas enanas, enanas marrones, cuerpos menores del Sistema Solar y nebulosas, zonas de nuestra galaxia ricas en gas y lugares de formación de polvo y estrellas. También, objetos fuera de nuestra galaxia, como cuásares o explosiones de rayos gamma.

Uno de los resultados más importantes obtenidos con NICS es el descubrimiento, en abril de 2009, del objeto astronómico más lejano jamás observado hasta este momento: el GRB090423. El análisis de los espectros obtenidos con el prisma Amici de NICS permitió estimar una distancia para este objeto de más de 13.000 millones de años luz. La explosión de rayos gamma sucedió cuando el Universo era sólo un niño con una edad de poco más de 600 millones de años.

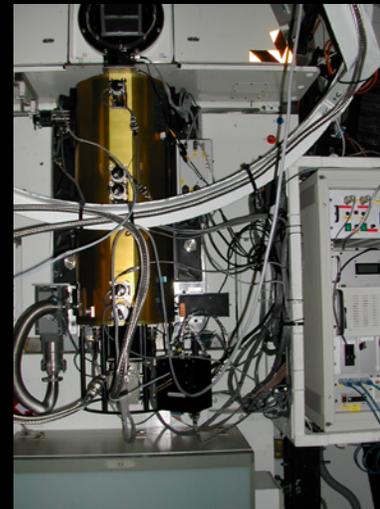


Cúpula e interior del Telescopio Nazionale Galileo (TNG). © G. Tessicini

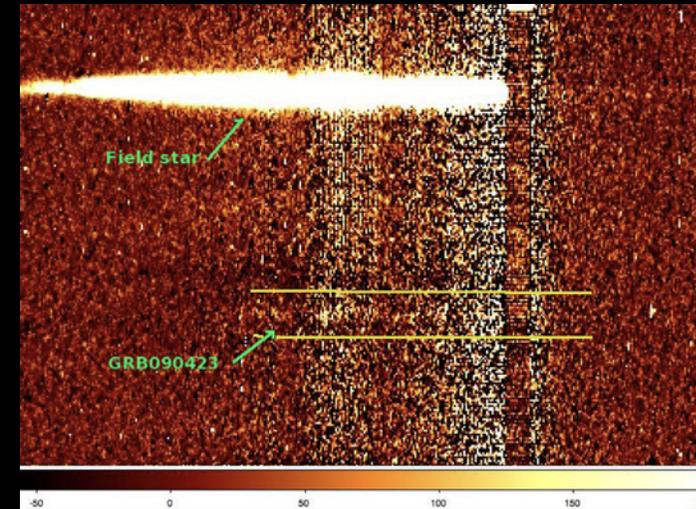
## GIANO B

GIANO-B es un espectrógrafo de alta resolución (R~50.000) desarrollado por el Observatorio de Arcetri y que trabaja en el infrarrojo cercano hasta 2,5 micras de longitud de onda en la banda K. Llegó al TNG en 2012 en su primera versión como GIANO y recibía la luz por una pareja de fibras ópticas. Gracias a una importante financiación de INAF en 2016, el instrumento se pudo colocar en el foco Nasmyth B, llamándose ahora GIANO-B, con un nuevo sistema óptico sin fibras para la captura de la luz del telescopio, un nuevo sistema de calibración y configuración, y que permite observar al mismo tiempo que HARPS-N. El nuevo sistema óptico incluye la posibilidad de introducir un elemento dicróico que separa la luz según su longitud de onda: la parte visible es enviada hacia HARPS-N, y la parte infrarroja, hacia GIANO-B. En esta configuración, que llamamos GIARPS, el TNG es el único telescopio en el mundo con una instrumentación capaz de obtener simultáneamente un espectro de alta resolución desde los 400 hasta los 2.500 nanómetros. Entre sus principales objetivos se encuentran los estudios de velocidades radiales para la caracterización de exoplanetas y de sus atmósferas, estudios químicos y dinámicos de objetos estelares o extragalácticos.

Gracias a los espectros obtenidos con GIANO cuando todavía estaba instalado en el foco Nasmyth A del



Nasmyth A del TNG y NICS. © G. Tessicini



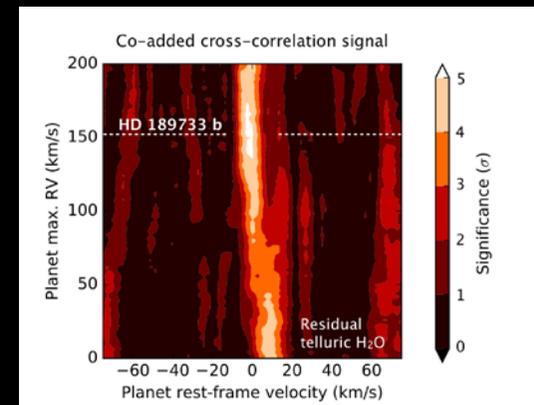
Espectro del Gamma Ray Burst GRB090423, el objeto astronómico más lejano jamás observado hasta abril de 2009. El espectro se obtuvo utilizando el prisma Amici instalado en NICS. © TNG



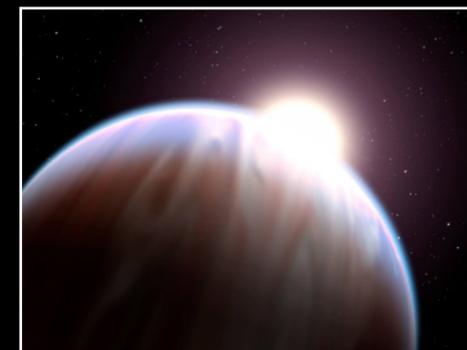
GianoB, el espectrógrafo infrarrojo de alta resolución del TNG. © A. Harutyunyan/TNG

telescopio, los astrónomos han podido detectar agua en la atmósfera de HD 189733b, un exoplaneta un poco más grande que Júpiter, pero que orbita más de 180 veces más cerca de su estrella madre, con una temperatura en su superficie de aproximadamente 1.200 grados. Cada 2,2 días, el planeta transita el disco estelar y una pequeña fracción de la luz estelar se filtra a través de su atmósfera, imprimiendo sus componentes moleculares.

GLORIA ANDREUZZI, HRISTO STOEVI, ADRIANO GHEDINA Y ENNIO PORETTI, Equipo del TNG



La figura muestra la señal de correlación cruzada total entre los espectros de transmisión GIANO del exoplaneta HD 189733b y un modelo que contiene absorción de vapor de agua. © Brogi, M. et al. (2018) "Exoplanet atmospheres with GIANO. I. Agua en el espectro de transmisión de HD 189733b", A&A. Vol. 615, A.16.



Impresión artística del planeta HD 189733b, donde se ha podido detectar agua con GIANO en el TNG. © NASA, ESA & G. Bacon (STScI)

# El infrarrojo con el NOT

El Nordic Optical Telescope (NOT) está ubicado en la parte más elevada del Observatorio del Roque de los Muchachos, en La Palma. Se inauguró en 1989 y está en operaciones desde 1990. Así empezó una larga colaboración entre Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suecia, con la posterior incorporación de Islandia. Desde 2019, el telescopio es propiedad de la Universidad de Turku, en Finlandia, y es operado por la Universidad de Aarhus, en Dinamarca, en consorcio con otras universidades nórdicas.

## ANTECEDENTES INFRARROJOS DE NOT

Varios grupos de investigación han usado el NOT con sus instrumentos infrarrojos en el pasado. Mencionamos la observación en 1994 con **CAMIRAS**, en una longitud de onda de 12 micras, de los impactos en Júpiter de los fragmentos del cometa Shoemaker-Levy. Aunque la imagen infrarroja más famosa del NOT es simplemente la de la Luna, obtenida en 3,45 micras con **SIRCA** (*Stockholm IR CAmera*), mostrando la superficie en el infrarrojo térmico.

Desde su instalación en 2001, el instrumento infrarrojo del NOT es **NOTCam**. Tiene un detector Hawaii, sensible en el infrarrojo cercano (0,9 – 2,5 micras) y dos cámaras para imágenes de media y alta resolución espacial (0,23 y 0,08"/pixel) y espectros de baja y media resolución espectral (R~2.000 y 5.000). Dispone además de una amplia colección de filtros estrechos.



NOTCam (Nordic Optical Telescope infrared Camera and Spectrograph)



Cúpula del telescopio NOT. © Daniel López/IAC

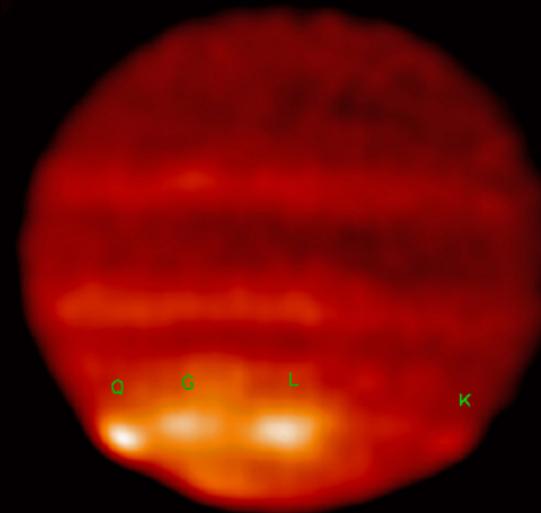


El telescopio NOT. © Magnus Gålfalk

La observación en el rango infrarrojo es imprescindible para el estudio de la formación estelar. Estrellas jóvenes siguen envueltas en la nube de la cual se forman. La extinción provocada por el polvo en esta nube las hace inaccesibles en el rango óptico, pero en el infrarrojo puede verse el polvo caliente y ver a través del polvo frío. Como ejemplo, NOTCam ha descubierto un nuevo cúmulo de estrellas. Ubicado en el exterior de nuestra galaxia a una distancia de 5,5 pc del Sol, alberga numerosas protoestrellas, envueltas en nubes de polvo y gas molecular.

El poder del infrarrojo para ver a través del polvo hace observables regiones oscurecidas, como el centro de nuestra galaxia. El rango infrarrojo es también importante en la observación de otros objetos, como estrellas relativamente frías, tanto enanas como las de mayor masa muy avanzadas en su evolución y de gran radio, cuyas temperaturas superficiales rondan los 2.000 K. Galaxias lejanas, con sus espectros muy desplazados al rojo, son igualmente de alto interés. En particular, hablamos de supernovas, cuásares, erupciones de rayos gamma y eventos de disrupción de estrellas por mareas de agujeros negros, todos ejemplos de objetivos para NOTCam.

Jupiter at 12 microns, 20 Jul 94, 20:30 UT

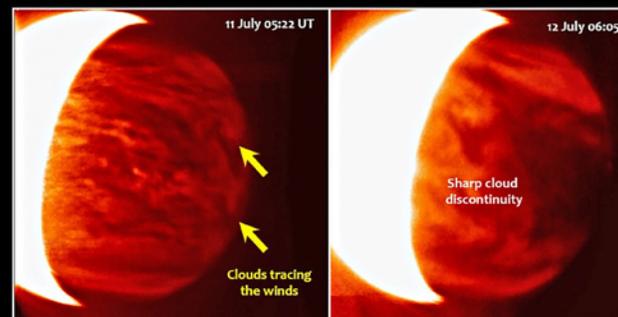


CEA camera CAMIRAS on the Nordic Optical Telescope

Impactos del cometa Shoemaker-Levy 9 en Júpiter en julio de 1994. © CAMIRAS Team – CEA, Saclay–, P.-O. Lagage, G. Olofsson et al.



La Luna vista con la cámara SIRCA. © M. Gålfalk, G. Olofsson, H.-G. Florén, Stockholm Observatory.



Cara nocturna de Venus en el infrarrojo. © J. Peralta, R. Baena et al.



Nuevo cúmulo de estrellas descubierto con NOTCam. © A. A. Djupvik/NOT



La kilonova AT2017gfo. © D. Malesani et al., University of Copenhagen

## OBSERVACIONES ESPECIALES Y PERSPECTIVA FUTURA

Otras muchas observaciones muestran la potencia del infrarrojo y merecen mención especial. Entre ellas, la observación con NOTCam, llevada a cabo parcialmente durante el día, de la cara nocturna de Venus, permitiendo el estudio de las capas profundas de la atmósfera del planeta y la alta velocidad de las nubes.

También, la observación de la kilonova AT2017gfo, que se realizó en condiciones difíciles de baja elevación del objeto sobre el horizonte y poco después de la puesta del Sol. GW170817, detectado a través de ondas gravitatorias por LIGO y VIRGO, junto con una fuerte señal de rayos gamma detectada por los satélites Fermi e Integral, activó la alerta, y NOT fue uno de los primeros en obtener observaciones. La detección de un nuevo objeto con NOTCam contribuyó a confirmar la existencia de las llamadas kilonovas, resultantes de la fusión de dos estrellas de neutrones.

En el futuro próximo, se prevé la instalación del instrumento **NOT Transient Explorer (NTE)**, actualmente en construcción, capaz de obtener imágenes y espectroscopía (R~4.000) simultáneamente en el óptico e infrarrojo en el rango desde 0,32 hasta 2,43 micras en una sola observación, combinando y mejorando las capacidades proporcionadas por la instrumentación actual.

ANLAUG AMANDA DJUPVIK,  
astrónoma del NOT

# El Telescopio Liverpool y el infrarrojo

El Telescopio Liverpool (LT, por su nombre en inglés), instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en La Palma, en 2003, es un telescopio robotizado de 2 m de diámetro, que trabaja de forma totalmente autónoma desde 2004. El LT puede ser controlado a distancia y también funcionar sin intervención humana a partir de una lista de observaciones priorizadas. Es actualmente uno de los tres mayores telescopios robóticos del mundo.

Se construyó para observar en longitudes de onda visibles y del infrarrojo cercano. La ingeniería del telescopio es muy similar a la de muchos de los otros grandes telescopios de La Palma, pero su modo de operación es único. Normalmente funciona sin que tenga que ser operado por nadie, siendo el software del telescopio el que toma las decisiones sobre cuáles son las observaciones a realizar en cada momento, partiendo de un listado de programas de observación aceptados y priorizados. Aunque, en ocasiones, se controla de forma remota desde Liverpool para observaciones públicas.



El Telescopio Liverpool y el mar de nubes. © Pablo Bonet, IAC



Interior del Telescopio Liverpool. © LT, LJMU

El telescopio está dedicado especialmente al estudio de fenómenos astronómicos variables, fuentes que presentan variaciones de brillo en escalas de tiempo de segundos a años. Estos incluyen las estrellas variables, discos de acrecimiento alrededor de agujeros negros, estrellas de neutrones, enanas blancas, cuásares y núcleos galácticos activos, lentes gravitatorias y objetos en movimiento como asteroides y cometas. De especial interés en este telescopio es su rapidez para detectar fenómenos transitorios, como las novas, supernovas y las contrapartidas ópticas de las explosiones de rayos gamma.

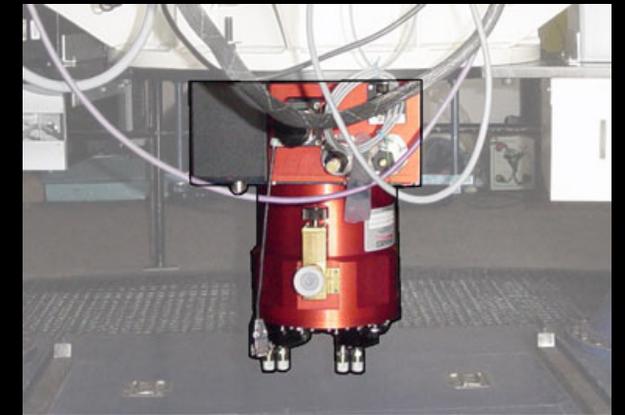
La Universidad John Moores de Liverpool (LJMU) es la propietaria del telescopio, pero el tiempo de observación está disponible para las comunidades española e inglesa, a través de sus comités de asignación de tiempo estándar, y para el resto de los astrónomos europeos a través de OPTICON. Un 10% del tiempo de observación con este telescopio se destina también a la comunidad educativa de Reino Unido (5%) y de España (otro 5%) para el desarrollo de proyectos de investigación con alumnado preuniversitario.

## INSTRUMENTOS INFRARROJOS

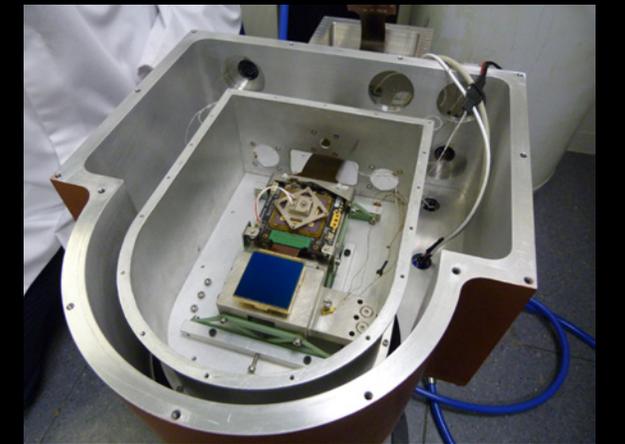
El telescopio Liverpool cuenta con una gran variedad de instrumentos, también para el infrarrojo.

El primero fue **SupIRCam**, una cámara para infrarrojo cercano construida conjuntamente por la LJMU (responsable del software y la integración) e IR Labs (responsable del hardware y la electrónica). La puesta en marcha inicial en el cielo se completó en abril de 2004 y la puesta en marcha robótica, en 2005. Estuvo en funcionamiento hasta 2010.

El **IO:I** es el componente de imagen del infrarrojo cercano del conjunto de instrumentos IO (*Infrared-Optical*). IO:O es la componente para imagen óptica de este sistema, con el que se combina para observar simultáneamente en el visible y en el infrarrojo cercano. Utiliza un detector de corte Hawaii 2RG de 1,7 micras de 2048x2048 píxeles con un campo de visión de 6,3 minutos de arco, una escala de píxeles de 0,18 segundos de arco y un filtro de banda H único (1,5-1,8 micras). Temporalmente retirado, estuvo disponible como instrumento de usuario común en agosto de 2015.



SupIRCam montado en el LT © LJMU



El instrumento IO:I del LT. © LJMU

Actualmente, la LJMU está desarrollando una nueva cámara infrarroja para el telescopio que planean poner en servicio y poner a disposición de los usuarios científicos este año, 2023. La nueva cámara utiliza un detector InGaAs de Raptor Photonics que será de mayor fiabilidad y mucho más fácil de mantener de forma remota. El detector admitirá una lectura muy rápida que se adaptará bien al tipo de ciencia que hace el telescopio Liverpool y estará equipado con una rueda de filtros para que se pueda observar en diferentes bandas infrarrojas.

(Información facilitada por IAIN STEEL y CHRISTOPHER COOPERWHEAT, del LT, LJMU)



Imagen tomada con OSIRIS (GTC) en el óptico de la nebulosa del Águila.

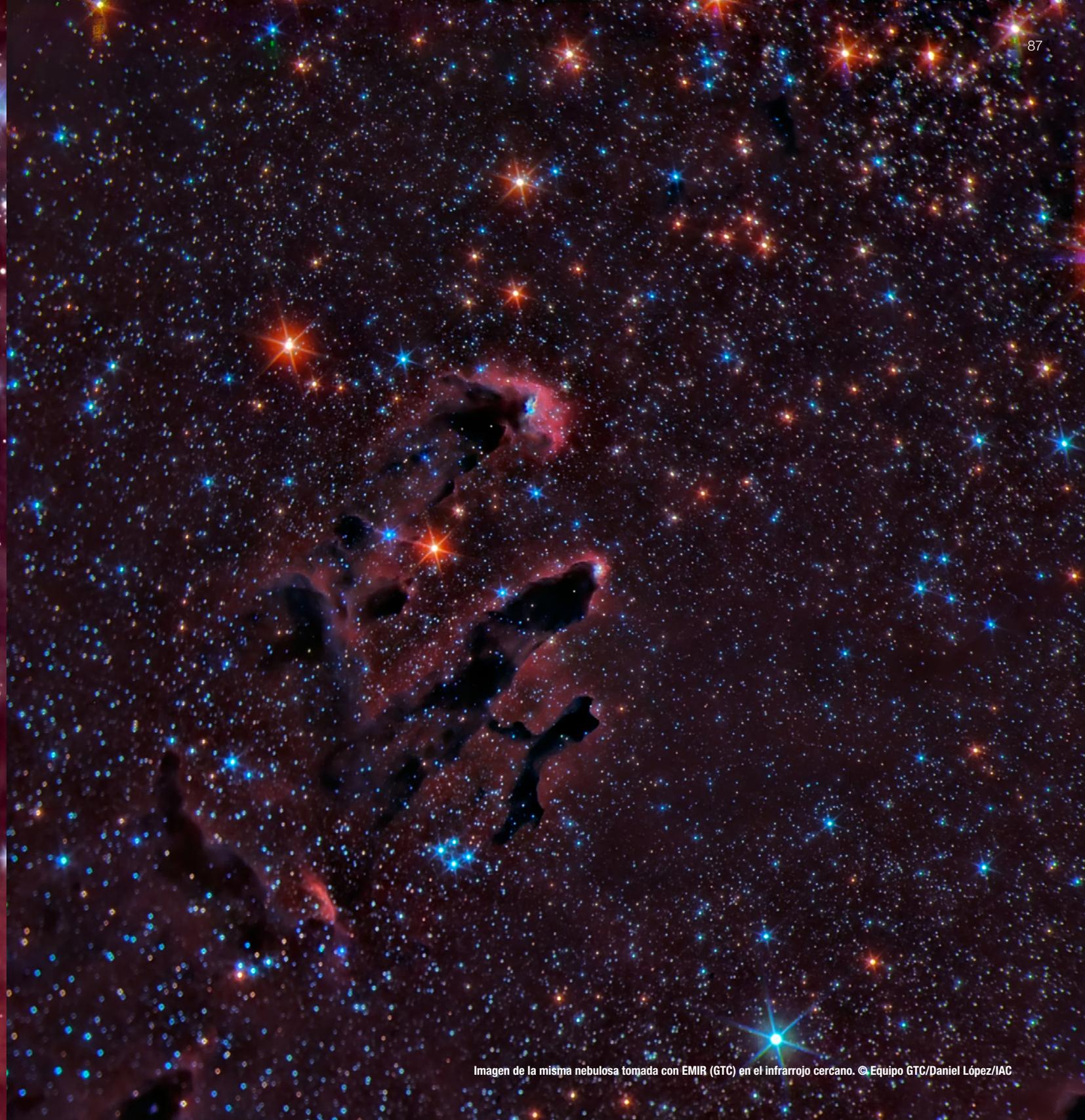


Imagen de la misma nebulosa tomada con EMIR (GTC) en el infrarrojo cercano. © Equipo GTC/Daniel López/IAC



# GRAN TELESCOPIO CANARIAS (GTC)

## El mayor telescopio óptico e infrarrojo del mundo

El Gran Telescopio Canarias (GTC), también conocido como GRANTECAN, se encuentra instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma. Con un espejo de 10,4 m de diámetro, es el telescopio óptico e infrarrojo más grande del mundo hasta el momento. Las observaciones en GTC comenzaron con su inauguración en 2009 y, desde entonces, su productividad científica ha aumentado significativamente. La ciencia realizada con el GTC cubre un amplio rango de campos de investigación gracias, por un lado, a su modelo de observación altamente flexible y de uso general, y por otro, a su versátil conjunto de instrumentos, varios de ellos operando en el infrarrojo. Desde la Tierra, y debido a la absorción atmosférica en el rango infrarrojo de la luz, sólo disponemos de unas estrechas ventanas para la observación de este tipo de radiación. Por esta razón, los instrumentos infrarrojos de GTC están optimizados para trabajar entre 0,9-2,5 micras en el infrarrojo cercano y entre 7,5-25 micras en el infrarrojo medio, longitudes de onda que son accesibles desde la superficie terrestre.

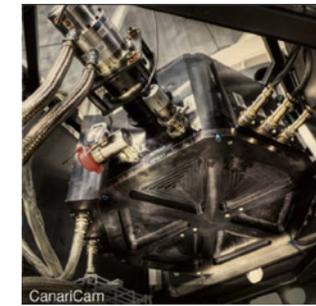
El éxito científico de cualquier telescopio depende en gran medida de su instrumentación post-foco. De ahí que exista para el GTC, desde sus inicios, un amplio programa de desarrollo tecnológico. Este gran telescopio tiene la capacidad de albergar varios instrumentos simultáneamente en sus estaciones focales y cubrir con ellos un rango espectral desde 360 nanómetros hasta 25 micras con distintos modos de observación (imagen directa, espectroscopía y polarimetría). Para maximizar su rendimiento científico, el telescopio está además preparado para aceptar instrumentos visitantes, ya que pueden aportar capacidades adicionales al GTC que no estén disponibles con su conjunto de instrumentos.

### INSTRUMENTACIÓN INFRARROJA PARA EL GTC

Entre toda la variedad de instrumentos de que dispone el GTC, destacan los que se dedican a detectar la radiación infrarroja. A lo largo de la vida del telescopio se ha ido incorporando cada vez más tecnología de este tipo a las operaciones nocturnas.

## INSTRUMENTOS DEL DÍA UNO O PRIMERA GENERACIÓN

### CanariCam



Tras el primer instrumento para uso científico en el GTC -OSIRIS, en el rango visible-, el siguiente instrumento instalado en el telescopio fue infrarrojo: CanariCam, diseñado y construido por la Universidad de Florida (IP: **Charles Telesco** e IP: **Mark Kidger**). Se trataba de una cámara infrarroja térmica y un espectrógrafo

con capacidades de polarimetría y coronografía, instalado en uno de los focos Nasmyth del GTC. Fue diseñado para alcanzar el límite de difracción del telescopio en longitudes de onda del IR medio (7,5-25 micras). Obtuvo su primera luz a finales de 2009, poco después de la inauguración del telescopio, tras apuntar a una estrella de la constelación de la Ballena. Después de su debut, este instrumento detector de calor comenzó su fase de ajustes a partir de la primavera de 2010, cuando puso a prueba todo su potencial para “ver” la luz infrarroja emitida por las estrellas y planetas más jóvenes del Universo. Su “primer calor” procedía de la estrella 20 Ceti, un brillante astro que se encontraba convenientemente posicionado para permitir su observación durante un período razonable de tiempo. Con un tamaño similar al motor de un coche, CanariCam se situaba a la vanguardia de la astronomía infrarroja y haría que una sola noche de observación en el GTC equivaliera a 40 jornadas en telescopios de cuatro metros. Único en su campo, este instrumento contribuyó al estudio de los campos magnéticos en la formación de sistemas planetarios y a la detección de planetas pequeños, fríos y difíciles de encontrar con otros métodos. Igualmente, contribuyó al estudio de agujeros negros supermasivos. Después de un período productivo de operación, CanariCam fue dado de baja en febrero de 2021.

El Gran Telescopio Canarias está financiado por la Comunidad Autónoma de Canarias y por el Estado Español (cofinanciado con fondos FEDER, Fondos Europeos de Desarrollo Regional), con la participación internacional de instituciones de México (IA-UNAM, Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México; INAOE, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, ambos cofinanciados por el CONACYT, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México) y de Estados Unidos (Fundación para la investigación de la Universidad de Florida). El Gran Telescopio Canarias forma parte de la red de Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares (ICTS) de España.

## INSTRUMENTOS VISITANTES

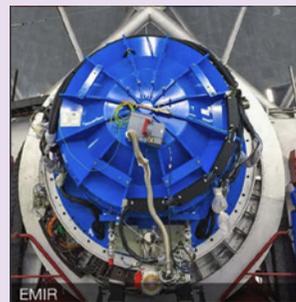
### CIRCE



En diciembre de 2014 se instaló el primer instrumento visitante en el GTC: *Canarias InfraRed Camera Experiment* (CIRCE), una cámara para el infrarrojo cercano que operaba en el rango de longitud de onda de 1-2,5 micras, y que fue diseñada y construida por la Universidad de Florida (IP: **Stephen Eikenberry**). CIRCE se limitaba a tomar imágenes de banda ancha en el infrarrojo cercano (filtros estándar JHK) con un campo de visión total de 3,4 x 3,4 arcmin y una escala de placa de 0,1"/píxel. Además, disponía de polarimetría con un campo de visión de 11x11 arcsec. CIRCE estuvo destinada a llenar el vacío de instrumentación infrarroja en el GTC mientras se preparaba el instrumento EMIR de segunda generación. Aunque formalmente era un instrumento visitante, se puso a disposición de la comunidad general durante dos años y finalmente dado de baja en septiembre de 2017.

## INSTRUMENTOS DE SEGUNDA GENERACIÓN

### EMIR



El siguiente instrumento de uso común construido para el GTC fue EMIR (Espectrógrafo Multiobjeto Infrarrojo), una cámara de gran campo y espectrógrafo multiobjeto de resolución intermedia en el infrarrojo cercano capaz de tomar espectros de más de 50 objetos simultáneamente entre 0,9 y 2,5 micras (IP: **Francisco Garzón**). Un sistema particular de rendijas fue especialmente diseñado para EMIR (CSU), así como los elementos dispersores construidos mediante la combinación de redes de difracción de alta calidad y prismas convencionales de gran tamaño. EMIR fue desarrollado por un consorcio liderado por el IAC, llegó al telescopio en 2016 y comenzó las operaciones regulares a mediados de 2017. Es un instrumento diseñado, fabricado, ensamblado y verificado enteramente en el IAC. Se usa de forma rutinaria en el telescopio para estudiar los objetos más fríos y distantes del Universo. Trabajar en este rango del espectro requiere enfriar el instrumento a unos -200 grados centígrados, temperatura que se consigue encerrándolo por completo en un tanque criogénico.

## INSTRUMENTOS DE TERCERA GENERACIÓN

El desarrollo de la instrumentación es un proceso largo y complejo que lleva un mínimo de cinco años antes de completar el proyecto. Para conseguir que el telescopio siga siendo competitivo por muchos años, hay que hacer una previsión de proyectos de instrumentación la década previa. Por este motivo, se encargó en 2008 a un panel independiente que analizara las necesidades futuras de instrumentación del GTC. En base al resultado de este estudio, se decidió continuar con el desarrollo de dos espectrógrafos de dispersión media, uno en el rango visible y otro en el infrarrojo cercano, que se implementarían en el telescopio alrededor de 2016-2017, MEGARA, en el visible, y MIRADAS, en el infrarrojo.

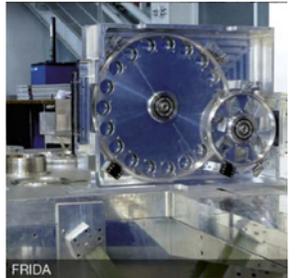


### MIRADAS

MIRADAS (*Mid-resolution InFRARED Astronomical Spectrograph*) se instaló en el GTC a mediados de 2022, con el objetivo de iniciar operaciones regulares a lo largo de 2023 (IP: **Stephen Eikenberry**; IP en IAC: **Francisco Garzón**). Este espectrógrafo multiobjeto operará en el infrarrojo cercano con una resolución espectral de  $R=20.000$ . Con él se podrán estudiar con más detalle estrellas supermasivas, el centro de la Vía Láctea y la evolución de las galaxias cercanas que nos rodean, entre otros objetivos. Dispondrá de 12 brazos robóticos para seleccionar los objetos celestes. Este proyecto ha sido subvencionado con fondos FEDER por la Agencia Canarias de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información del Gobierno de Canarias, bajo el lema "Canarias avanza con Europa".

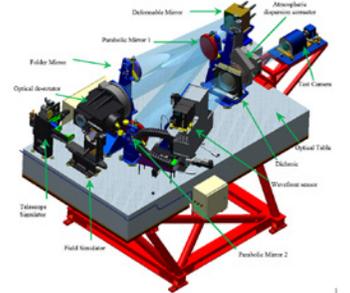
### FRIDA

Otro instrumento para GTC, que se encuentra en sus últimas fases de desarrollo, es FRIDA (*inFRARED Imager and Dissector for Adaptive optics*). FRIDA es el "primer" instrumento que hará uso completo del sistema de Óptica Adaptativa GTCAO, pudiendo tomar imágenes en filtros de banda ancha y banda estrecha, así como facilitar la espectroscopía de campo integral en el rango espectral de 0,9-2,5 micras. FRIDA (IP: **Almudena Prieto**) es un proyecto liderado por el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en colaboración con el IAC y la Universidad de Florida. Está previsto que llegue al telescopio a finales de 2024.



### GTCAO

Junto con los instrumentos, otro paso importante será la instalación de un sistema de Óptica Adaptativa (GTCAO) que compensará las turbulencias atmosféricas en el campo de visión. Está previsto que GTCAO funcione en el infrarrojo cercano (0,9-2,5 micras). El sistema operará con un sistema de estrella guía natural inicialmente y con un sistema de guía láser uno o dos años más tarde. El primer instrumento científico que usará GTCAO será la cámara IR provisional GRANCAIN hasta la llegada del instrumento FRIDA al telescopio. Este proyecto ha sido cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) dentro del marco del Programa Operativo de Canarias 2007-2011.



Vista 3D del modelo de los componentes de GTCAO

## PRÓXIMA GENERACIÓN DE INSTRUMENTOS DEL GTC (2027-)

El actual plan de instrumentación en el GTC se completará alrededor de 2024. En ese momento, seis o siete instrumentos científicos llenarán el gran conjunto de estaciones focales del GTC. Con ellos se garantiza la competitividad científica del telescopio durante varios años, considerando que el GTC seguirá siendo el mayor telescopio óptico e infrarrojo en funcionamiento hasta la llegada de la nueva generación de telescopios extremadamente grandes. Aun así, pensando en el futuro, GRANTECAN ha abierto un proceso que ya está en marcha para definir la próxima generación de instrumentos y seguir avanzando.

ROMANO CORRADI,  
director del GTC  
NIEVES CASTRO RODRÍGUEZ,  
astrónoma de soporte del GTC

Gran Telescopio Canarias (GTC) © Pablo Bonet (IAC)

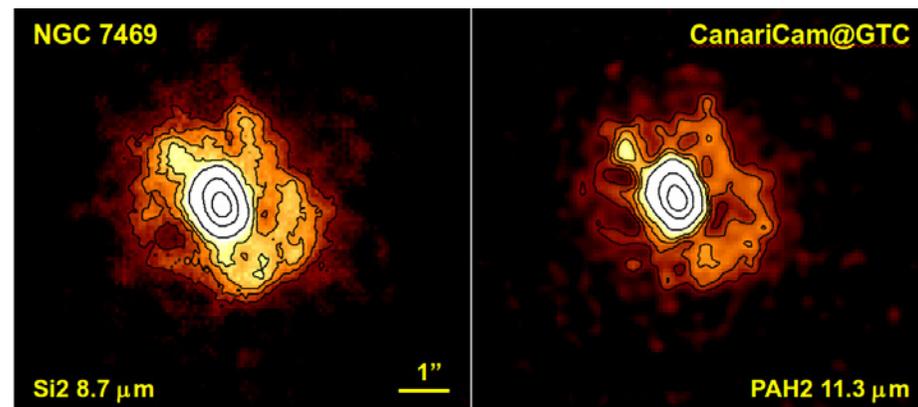


# ALGUNOS RESULTADOS CON CANARICAM

## LA GALAXIA ESPIRAL BARRADA SY1 NGC 7469

En noviembre de 2012 y tras seis años de trabajo, el programa Consolider-GTC (Gran Telescopio Canarias), en su quinta y última reunión, hizo un repaso por el proyecto, examinando el legado y los resultados obtenidos, entre ellos, el primer espectro de una galaxia activa en el infrarrojo medio obtenido con el instrumento CanariCam. Además de hacer espectroscopía, polarimetría y coronografía, este instrumento podía obtener imágenes de objetos lejanos para analizar su forma, su estructura y su composición. Fue el caso de la galaxia espiral barrada Sy1 NGC 7469.

Combinando CanariCam con el tamaño del GTC (10,4 m de diámetro) y con una excelente calidad de la atmósfera en el infrarrojo medio, es posible separar la emisión del centro de las galaxias del resto de la misma, consiguiendo que el instrumento penetre en las regiones nucleares de las galaxias activas con una gran sensibilidad y resolución. En esta reunión, **Cristina Ramos Almeida**, investigadora del equipo Consolider-GTC ESTALLIDOS-IAC y miembro del grupo de investigación "Los Piratas", mostró el primer espectro en el infrarrojo térmico obtenido con el GTC. Debe tenerse en cuenta que el infrarrojo térmico es un rango espectral muy complicado de observar desde tierra debido a la gran absorción producida por el vapor de agua atmosférico, por lo que habitualmente sólo se observa desde el espacio mediante satélites.



En esta imagen podemos ver la galaxia espiral barrada Sy1 NGC 7469 en dos bandas de las disponibles en el instrumento CanariCam, instalado en el GTC. Las imágenes en el IR medio, como las que se muestran, proporcionan información del centro de la galaxia. En este caso, el núcleo activo central (en blanco) está rodeado de zonas de formación estelar intensa (en amarillo). © CanariCam/GTC; Grupo "Los Piratas".



Galaxias en interacción: galaxia espiral barrada Seyfert 1 NGC 7469 (Arp 298, Mrk 1514) y su compañera IC 5283. Imagen obtenida por el telescopio espacial Hubble. La galaxia espiral barrada Sy1 NGC 7469 es una luminosa fuente infrarroja con un potente estallido de formación estelar embebido en su región circunuclear. El sistema se encuentra a unos 200 millones de años luz de la Tierra en la Constelación de Pegasus. © NASA, ESA, colaboración Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble, y A. Evans (Universidad de Virginia, Charlottesville/NRAO/Universidad Stony Brook).

Consolider Ingenio 2010-GTC "Primera Ciencia con el Gran Telescopio Canarias (GTC): La Astronomía Española en Vanguardia de la Astronomía Europea", fue un proyecto global basado en el GTC financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y cofinanciado por la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Este proyecto, enfocado a objetivos, contó con la participación de 19 equipos de trabajo con un total de más de 150 investigadores.

Los programas CONSOLIDER siguen una línea estratégica cuyo fin es conseguir la excelencia investigadora aumentando la cooperación entre científicos y formando grandes grupos de investigación. En concreto, el programa Consolider-GTC trató de aprovechar este telescopio como trampolín para hacer ciencia puntera con datos de este gran telescopio, lograr mayor implicación de la comunidad astronómica en proyectos de instrumentación astronómica, utilizar el GTC como palanca para conseguir una importante participación española en la nueva generación de Telescopios Gigantes (ELTs) y comunicar a la sociedad los principales resultados.

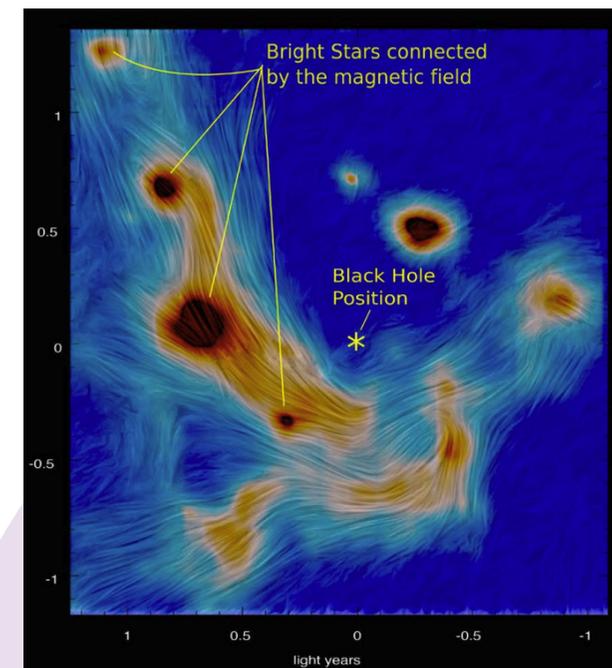
IP Grupo GTC/ ESTALLIDOS-IAC: José Miguel Rodríguez Espinosa.

## SAGITTARIUS A\*, EL AGUJERO NEGRO SUPERMASIVO DEL CENTRO DE NUESTRA GALAXIA

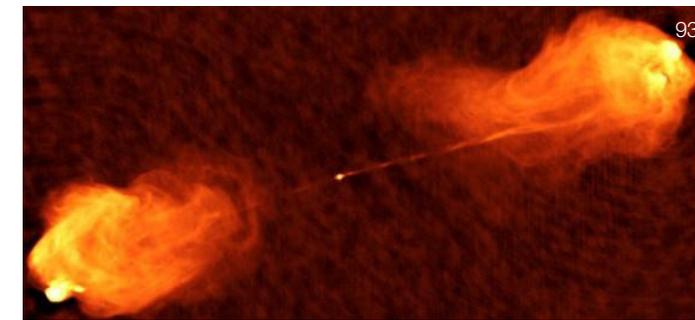
En principio, todas las galaxias tienen un agujero negro supermasivo en su centro. La Vía Láctea no es una excepción, alberga uno de cuatro millones de masas solares. Es conocido como Sagittarius A\* (Sgr. A\*) y está localizado a 26.500 años luz, lo que lo convierte en el agujero negro supermasivo más cercano a nuestro sistema solar. Su observación se ve obstaculizada por la presencia de grandes cantidades de gas y polvo que oscurecen, a lo largo de nuestra línea de visión, el centro de nuestra galaxia. Esto provoca que sea completamente inaccesible en el rango de longitud de onda visible. Sólo se puede penetrar esta cortina de gas y polvo en longitudes de onda más largas, como las del infrarrojo o las de radio. La región alrededor de Sgr A\* se observó a aproximadamente 12,5 micras con CanariCam. Estas observaciones permitieron obtener un mapa con una resolución espacial de 0,3 segundos de arco que cubre aproximadamente un año luz alrededor del agujero negro. La cantidad y la orientación de la polarización de la luz emitida por el polvo proporciona información sobre las propiedades del campo magnético del medio interestelar y su relación con las poblaciones estelares que rodean al agujero negro supermasivo.

### REFERENCIA:

-Roche, P.F.; López-Rodríguez, E.; Telesco, C.M.; Schödel, R.; y Packhamet, C. (2018). "The magnetic field in the central parsec of the Galaxy", MNRAS, 476, 1, 235-245.



Líneas de campo magnético en el Centro Galáctico derivadas del mapa de polarización obtenida con CanariCam en el GTC.



Vista de los jets en Cygnus A. © NRAO/AUI.

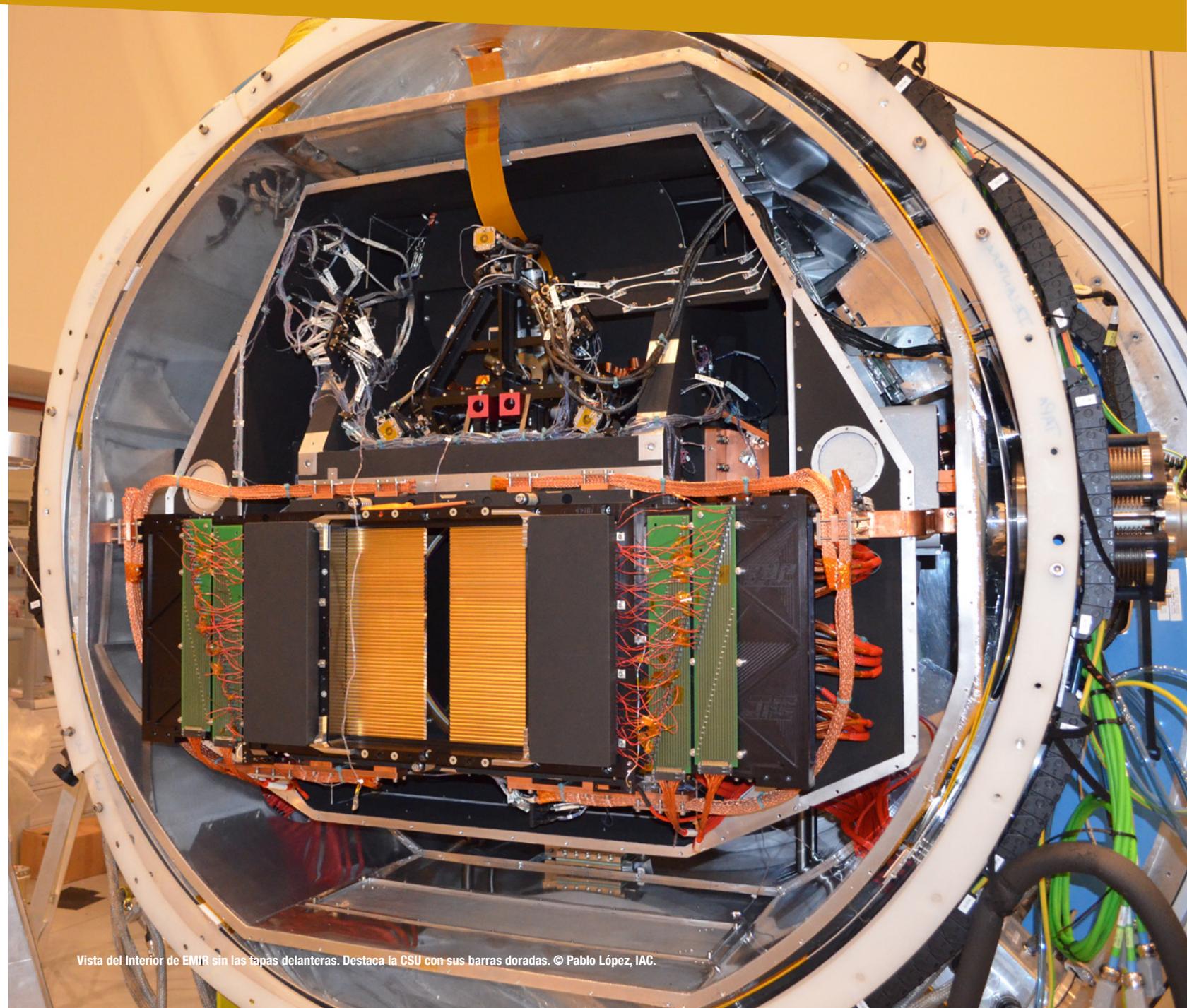
## LA GALAXIA ACTIVA CYGNUS A

Cygnus A es una galaxia elíptica situada a unos 600 millones de años luz con un agujero negro supermasivo en su centro que está absorbiendo materia de su entorno. Cuando esto sucede, se producen poderosas emisiones de radiación electromagnética, además de la formación de dos grandes chorros de partículas, llamados jets, que surgen del núcleo galáctico y son lanzadas casi a la velocidad de la luz hacia los confines de la galaxia. La combinación de la gran resolución del GTC y CanariCam ofrecía unas prestaciones únicas para la observación por primera vez de las proximidades del núcleo de una galaxia activa usando técnicas polarimétricas en el infrarrojo medio, que permiten estudiar la intensidad y orientación de las ondas electromagnéticas. A raíz de estas observaciones, los astrónomos han podido saber que el plasma que está siendo eyectado por el núcleo activo se mueve alrededor del campo magnético del jet, lo que genera un tipo de radiación llamado "radiación de sincrotrón", provocada por el rápido movimiento de electrones a través de los campos magnéticos. Si bien este fenómeno ya se había observado en otras longitudes de onda, fue la primera vez que se detectaba en el infrarrojo medio, confirmando que el plasma en el jet de Cygnus A está altamente confinado por la influencia del campo magnético. Cygnus A muestra una estructura muy compleja con un núcleo compacto y los sendos chorros o jets de material moviéndose desde el centro a los confines de la galaxia, todo ello oculto bajo un manto de polvo con una estructura irregular que resulta impenetrable para la luz visible. Por este motivo, el equipo de investigación recurrió a CanariCam, un instrumento creado para detectar la luz infrarroja que escapa de la galaxia, que no es bloqueada por el polvo cósmico. Estas emisiones provienen de materiales que no están lo suficientemente calientes para emitir luz en el espectro visible, pero que tienen la temperatura suficiente para hacerlo en el rango del infrarrojo, en torno a unos 220K (-53°C).

### REFERENCIA:

-López-Rodríguez, E.; Packham, C.; Tadhunter, C.; Mason, R.; Perlman, E.; Alonso-Herrero, A.; Linares G.; Ramos Almeida, C.; Ichikawa, K.; Levenson, N.A.; Rodríguez-Espinosa, J.M.; Álvarez, C.A.; Ramírez, E.A.; y Telesco, C.M. (2014). "Polarized mid-infrared synchrotron emission in the core of Cygnus A". AJ, 793, 81.

# VIAJE AL INTERIOR DE EMIR



Vista del Interior de EMIR sin las tapas delanteras. Destaca la CSU con sus barras doradas. © Pablo López, IAC.

Los instrumentos astrofísicos para telescopios están compuestos principalmente por una óptica que, junto a la propia del telescopio, nos permite estudiar los objetos del Universo. A la hora de iniciar el diseño de un instrumento como EMIR siempre partimos de una óptica ideal, o mínima, que nos permitirá cumplir nuestros objetivos científicos. Decimos mínima porque el volumen máximo que puede ocupar el instrumento dentro del telescopio nos obliga a introducir elementos adicionales para redirigir la luz y disminuir el tamaño total del mismo. El recorrido que hace la luz dentro del instrumento, hasta obtener una imagen óptima, viene marcada por la focal del telescopio, nuestra propia óptica y las características del elemento que obtiene la imagen final, que es el detector.

El detector es una pieza clave porque sus características de operación marcan las condiciones a las que debe estar el interior del instrumento. El detector de EMIR es un chip de estado sólido, denominado comercialmente HAWAII-2 HgCdTe ((2048x 2048 pixels) (18 micras/pixel) que, a temperaturas del orden de  $-200^{\circ}\text{C}$ , es sensible al infrarrojo. Esto implica que tanto él como todos los elementos por los que pasa la luz en el instrumento, deben operar a estas temperaturas para obtener una imagen nítida no contaminada térmicamente. Para poder tener el interior del instrumento a estas temperaturas debemos, además, tener condiciones de vacío. EMIR opera a una presión en su interior de  $2 \times 10^{-6}$  mbar.

En los laboratorios se usan las mesas ópticas para sujetar los elementos por los que pasa la luz en los experimentos. En nuestro caso, debemos hacer algo equivalente para poder anclar los elementos por los que pasa la luz en el interior del instrumento. Así, se diseña una estructura mecánica específica (banco óptico), que debe garantizar que los elementos ópticos mantengan las distancias y el alineado que se les requiere, en cualquiera de las posiciones que esté el instrumento y sea cual sea la temperatura en el rango de operación. Esto obliga a que el banco óptico sea muy estable estructuralmente. En EMIR, el banco óptico es similar a un cubo y es la pieza central sobre la que se ha ido construyendo el instrumento, partiendo de la integración de la óptica. El esquema óptico básico inicial se va complementando con los elementos necesarios para que EMIR cumpla las características y funcionalidades para las que se ha diseñado, y con el fin de cubrir sus objetivos científicos.

## CÁMARA/ESPECTRÓGRAFO

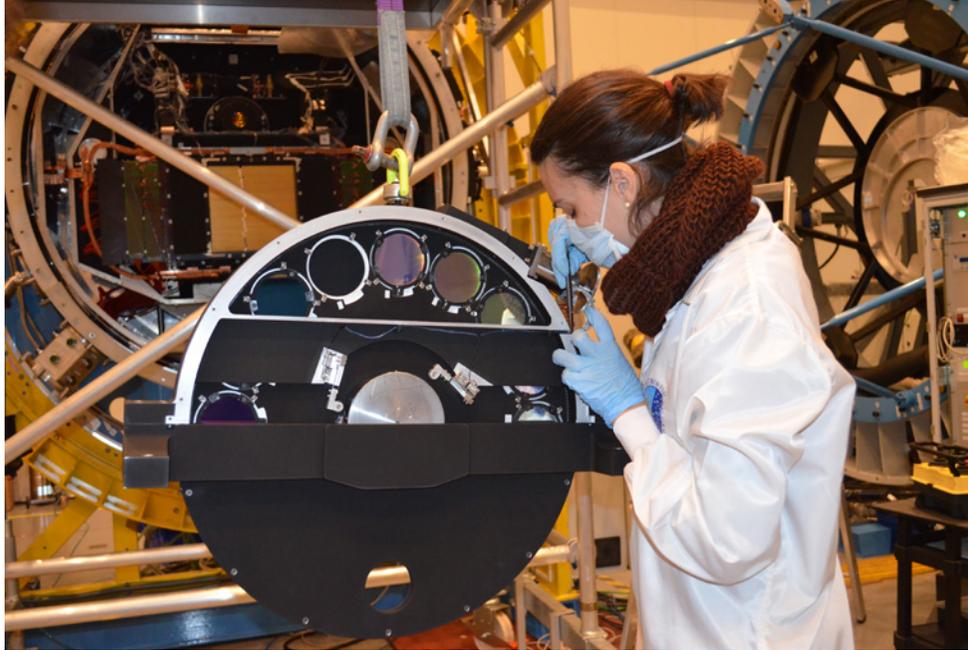
EMIR es una cámara espectrógrafo infrarrojo que opera en el rango de longitudes de onda de 0,9–2,5 micras y con 3 modos de observación: Modo Imagen, Modo Espectroscopía de Rendija Larga (LS) y Modo Espectroscopía Multiobjeto (MOS). El campo de EMIR es de  $6,64 \times 6,64$  arcmin<sup>2</sup> en modo imagen y de  $6,64 \times 4$  arcmin<sup>2</sup> en espectroscopía.

Funcionando como Cámara (Modo Imagen), necesitamos la óptica básica (Colimador-cámara) y el detector. Según lo que vayamos a observar podemos querer separar la luz de una longitud de onda determinada. Para ello, antes de que llegue la luz al detector, esta se pasa por un filtro óptico. El tamaño de los filtros viene marcado por el diseño óptico y, como el mecanismo que los contiene no puede ser tan grande como queramos, debemos seleccionar bien los filtros que va a tener el instrumento. En EMIR, los filtros están colocados en una rueda que tiene una capacidad para 14 filtros (entre ellos Y, J, H, K-short, K, K spect, Fell, Cont. Fell, Brackett-gamma, Cont. Br-gamma, H2 (1-0), H2 (2-1), YJ, HK). La rueda tiene además una posición sin filtro y otra bloqueada (*Open* y *Opaque*) para cuando queremos tomar imagen directa (sin filtrar) o corriente de oscuridad.

Funcionando como Espectrógrafo, además de los elementos que necesitamos para obtener una imagen en el modo anterior, tenemos que añadir algo nuevo, un elemento dispersor, para descomponer la luz y generar su espectro. Estos elementos suelen ser prismas rayados (grismas) para descomponer y dirigir el haz con la inclinación que nos interesa. EMIR tiene elementos dispersores de baja resolución y de alta. El de baja resolución (987 para YJ y HK) es un grisma estándar. A los grismas de alta resolución los llamamos pseudo-grismas, porque al no poderse fabricar un prisma rayado con las prestaciones requeridas, se han hecho formando un “sandwich”, donde el interior es una red (elemento dispersor, rayado) y el exterior son dos prismas que redirigen el haz a la entrada y salida del dispositivo, como nos interesa. EMIR dispone de 3 pseudo-grismas con resoluciones espectrales entre 4.000 y 5.000 en las bandas infrarrojas J, H y K. Estos elementos dispersores se colocan en una rueda de grismas, que dispone de una posición abierta para que pueda pasar la luz sin dispersarse en las observaciones en modo imagen.

Para dejar pasar solo la luz del objeto del que queremos obtener el espectro, colocamos en el plano focal del telescopio (que está a la entrada del instrumento) una máscara. La máscara para un objeto es una rendija. Con una rendija larga observaremos en Modo Espectroscopía de Rendija Larga (LS). Si queremos observar muchos objetos a la vez, colocamos una máscara “Multiobjeto”, con muchas rendijas, una por cada objeto a observar, y esto nos permite hacer el espectro de todos esos objetos a la vez. En este caso, estaríamos observando en Modo Espectroscopía Multiobjeto (MOS). En la mayoría de espectrógrafos, estas máscaras son chapas rígidas (troqueladas) y no podemos reconfigurarlas con el instrumento frío, sino cambiar de una chapa a la otra colocándolas en mecanismos, por ejemplo, en una rueda, como en el instrumento LIRIS. En EMIR, sí podemos, tenemos un mecanismo CSU (Configurable Slit Unit) con 110 barras colocadas a ambos lados de la apertura, a la entrada del





A la izquierda, ajustes previos a la integración de la rueda de filtros en EMIR. A la derecha, sistema de posicionado del detector (DTU).

instrumento y donde se forma el plano focal del telescopio. Las 110 barras están 55 a la izquierda y 55 a la derecha. Si movemos estas barras y enfrentamos una de la derecha, con su pareja de la izquierda, podemos llegar a formar una máscara con 55 rendijas de la longitud y en la posición que necesitemos, con lo que podremos observar simultáneamente, como máximo, 55 objetos. Al tener que mover 110 barras, en condiciones criogénicas y con alta precisión (6 micras), todo se complica, tanto la electrónica de control como la mecánica, involucrando complejos procesos de calibración.

EMIR está integrado en uno de los focos Nasmyth de GTC. Por tanto, todo el instrumento gira durante una observación. Para garantizar que la imagen del detector, independientemente de la posición en la que esté el instrumento, no sufra deterioro por las flexiones mecánicas internas, el detector está colocado en un mecanismo llamado DTU (*Detector Translation Unit*) que desplaza el plano del detector en 3 ejes. El movimiento en Z permite ajustar el foco ( $\pm 2,0$  mm), y los ejes X e Y permiten compensar los desplazamientos de la imagen ( $\pm 50$  micras *Fine Mode*,  $\pm 400$  micras *Raw mode*) durante la rotación del instrumento con el objeto de obtener una imagen estable en el detector.

### CONDICIONES CRIOGÉNICAS

Ya tenemos todos los elementos para poder observar. Pero, para mantener las condiciones criogénicas, necesitamos lo que llamamos CCCs (*Close Cycle Coolers*) o “Cabezas frías”, que son los dispositivos que permiten alcanzar y mantener las bajas temperaturas. EMIR tiene cuatro, y necesitan estar conectadas a dos compresores, ubicados en una sala específica, con el fin

de no transmitir vibraciones al instrumento. Para ayudar en el proceso inicial de enfriamiento de EMIR podemos usar nitrógeno líquido. EMIR tiene en su interior dos tanques de 33 litros de capacidad para ser usados con este fin.

El vacío en el interior de EMIR lo garantizamos con una bomba principal de alto vacío (Bomba Turbomolecular). Otra Bomba Auxiliar permite ayudar a recuperar el vacío, en caso de deterioro del mismo, sin necesidad de conectar una externa. Para controlar el sistema de vacío, EMIR está dotado de un sistema de control de vacío PLC (*Programmable Logic Controller*) que automáticamente gestiona las maniobras que requieren apertura y cierre de válvulas, apagado o encendido de bombas o CCCs, así como el uso de elementos externos, como una bomba rotatoria (Bomba Primaria), para situaciones de emergencia o de inicio del vacío en EMIR. El vacío y su temperatura son sus constantes vitales, y deben garantizarse las 24 horas y los 7 días de la semana. Por ello, el PLC de control de vacío es muy importante para garantizar la integridad de EMIR.

Si el interior del instrumento debe estar a temperaturas muy frías, y el exterior a temperatura ambiente, debemos cubrir el interior del mismo con pantallas de aislamiento (cascarones) que nos permitan mantener el frío. Las pantallas de EMIR forman como una *matrioshka*, una muñeca rusa, una dentro de la otra. Cada pantalla está a diferente temperatura, con saltos térmicos desde el frío del interior ( $-200$  °C) hasta la temperatura ambiente del exterior. Para garantizar estos saltos térmicos, además, deben estar aisladas unas de las otras. EMIR tiene una capa externa (azul), que es el propio criostato y, hacia el interior, una pantalla pasiva, una pantalla activa y una pantalla fría. Entre la pantalla pasiva y la activa hay unas mantas térmicas multicapas (*blanket*

*multilayer MLI-30*) que están compuestas de 30 capas de láminas (como el papel de aluminio) que hacen de nuevas pantallas y que, a su vez, están aisladas una de la otra por una malla de fibra.

El gran tanque azul criogénico, “criostato”, que contiene EMIR, es el que garantiza que el instrumento mantenga su interior hermético en condiciones de vacío y está lleno de aperturas, estancas. La principal es la ventana, que está formada por una gran lente, donde se inicia el camino óptico hacia el interior del instrumento. Para proteger la ventana tenemos un mecanismo, externo a EMIR, que nos permite cubrirla o no. Los CCCs y las bombas también están instalados en aperturas del criostato. Tenemos aperturas estancas para el paso de todos los cables de control de los mecanismos del interior (1 motor rueda de filtros, 1 motor rueda de grismas, 3 motores DTU y la CSU: 110 actuadores (Uno por barra) 110 sensores capacitivos de posición (Uno por barra), etc.), así como los cables de los 48 sensores de temperatura que están en el interior. Los sensores de temperatura del detector, conectados a una unidad que controla una resistencia calefactora detrás del detector, nos permiten mantener estable la temperatura del mismo a 77K. Los 48 sensores de temperatura distribuidos por el interior del instrumento nos informan de cómo están las condiciones en el interior, y en caso de averías pueden darnos información útil para el diagnóstico. Al estar en condiciones criogénicas no tenemos acceso al interior y para hacer las tareas de mantenimiento, una vez cada uno o dos años es necesario calentarlo y abrirlo.

EMIR ha sido diseñado, fabricado, ensamblado y verificado en el Instituto de Astrofísica de Canarias. Tras el diseño y fabricación, la integración de EMIR en los Laboratorios del IAC fue un proceso muy cuidadoso que involucró a ingenieros de todas las especialidades: Óptica, Electrónica, Mecánica, Software y personal de los talleres del IAC (Electrónica, Mecánica) y Delineación Técnica. Todo ello bajo la coordinación de los gestores

de Proyecto y conjuntamente con el equipo científico liderado por el Investigador Principal.

EMIR se integró en el Gran Telescopio Canarias (GTC) en mayo de 2016 y obtuvo su primera luz el 13 de junio de 2016. La integración en el GTC se preparó exhaustiva y conjuntamente entre los ingenieros de EMIR y del GTC, y fue un éxito. Posteriormente entraría en operación científica.

Construir EMIR no ha sido fácil. Al ser un instrumento criogénico “vivo” de grandes dimensiones, con dos mecanismos únicos y complejos, su operación y mantenimiento también son un reto. Por ello, las fases de operación y mantenimiento se prepararon conjuntamente con personal del telescopio, para poder hacer una transferencia gradual y sin riesgos para el propio instrumento. Las mejoras que se puedan identificar durante la operación también son estudiadas conjuntamente para garantizar, con su implementación, la optimización de los resultados científicos.

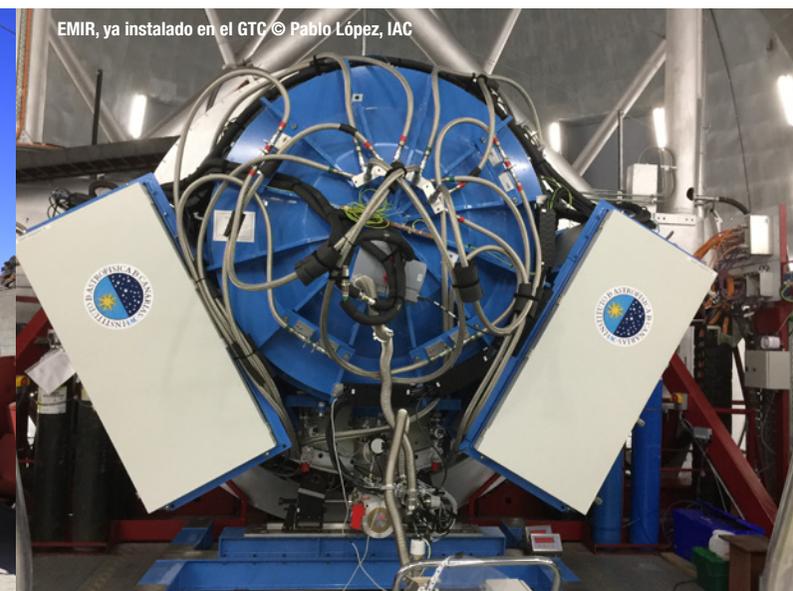
EMIR ha ido cumpliendo objetivos y, desde aquel lejano esquema óptico inicial hasta hoy, podemos decir orgullosos que puede vislumbrar los secretos del Universo desde el mayor telescopio óptico e infrarrojo del mundo, el Gran Telescopio Canarias.

Como gestora del proyecto, mi agradecimiento a todas las personas que han hecho posible EMIR. Puede que, si lo repitiéramos cambiáramos algunas cosas (cómo no, hay muchas lecciones aprendidas), pero los instrumentos para telescopios son únicos, casi prototipos. El equipo (de EMIR y del GTC) es y ha sido siempre lo mejor, y ese sí que no lo cambiaría y merece todo mi reconocimiento. ¡Gracias por el esfuerzo en hacerlo realidad y enhorabuena por los hitos cumplidos!

MARY BARRETO,  
ingeniera y gestora técnica de EMIR



EMIR, sin la cubierta y sobre el sistema de amortiguación para transportarlo, listo para su entrada en el edificio de GTC junto con el equipo del transporte.



EMIR, ya instalado en el GTC © Pablo López, IAC

## “EL VIAJE DEL ELEFANTE”

En su novela histórica *El viaje del elefante*, el escritor portugués José Saramago relató con lúcido humor el viaje épico de un paquidermo asiático que el rey Juan III de Portugal ofreció a su primo, el archiduque Maximiliano de Austria, y que recorrió Europa hasta Valladolid a mediados del siglo XVI. Unos cinco siglos después, otro “elefante” haría también un periplo histórico.

El espectrógrafo EMIR, instalado en el Gran Telescopio CANARIAS (GTC), es un instrumento diseñado, fabricado, ensamblado y verificado enteramente en el Instituto de Astrofísica de Canarias, con colaboraciones de instituciones españolas y francesas. Obtiene imágenes y espectros en el infrarrojo cercano, lo que le permite ver los objetos más fríos y distantes del Universo. Es criogénico, porque para trabajar en ese rango del espectro se requiere enfriarlo en un tanque cerrado a unos  $-200^{\circ}\text{C}$ . Al igual que OSIRIS (*Optical System for Imaging low Resolution Integrated Spectroscopy*), otra herramienta astronómica del GTC, es un instrumento versátil que, sumado al espejo de 10,4 m de diámetro del telescopio, permite observaciones novedosas y de muy alta precisión.

El instrumento salió el 19 de mayo de 2016 de la sede central del IAC, en La Laguna (Tenerife), con destino al Observatorio del Roque de los Muchachos, en Garafía (La Palma). Su traslado hasta el GTC fue lento y cuidadoso debido a la combinación de su gran tamaño y peso con lo delicado de sus componentes. El 2 de junio se realizó con éxito la integración del espectrógrafo. Tras varios días de pruebas posteriores a su llegada al Observatorio, EMIR se trasladó a la base del telescopio y se llevaron a cabo las maniobras de elevación con grúa hasta una de las plataformas laterales del GTC y su instalación en el rotador, donde se recibe la luz.

El trabajo conjunto de los equipos de EMIR y del GTC fueron de gran importancia para el buen desarrollo de estas maniobras, nada sencillo dado el peso del instrumento (casi 6 toneladas, con la electrónica auxiliar), su tamaño (casi 3 m de diámetro) y la altura a la que había

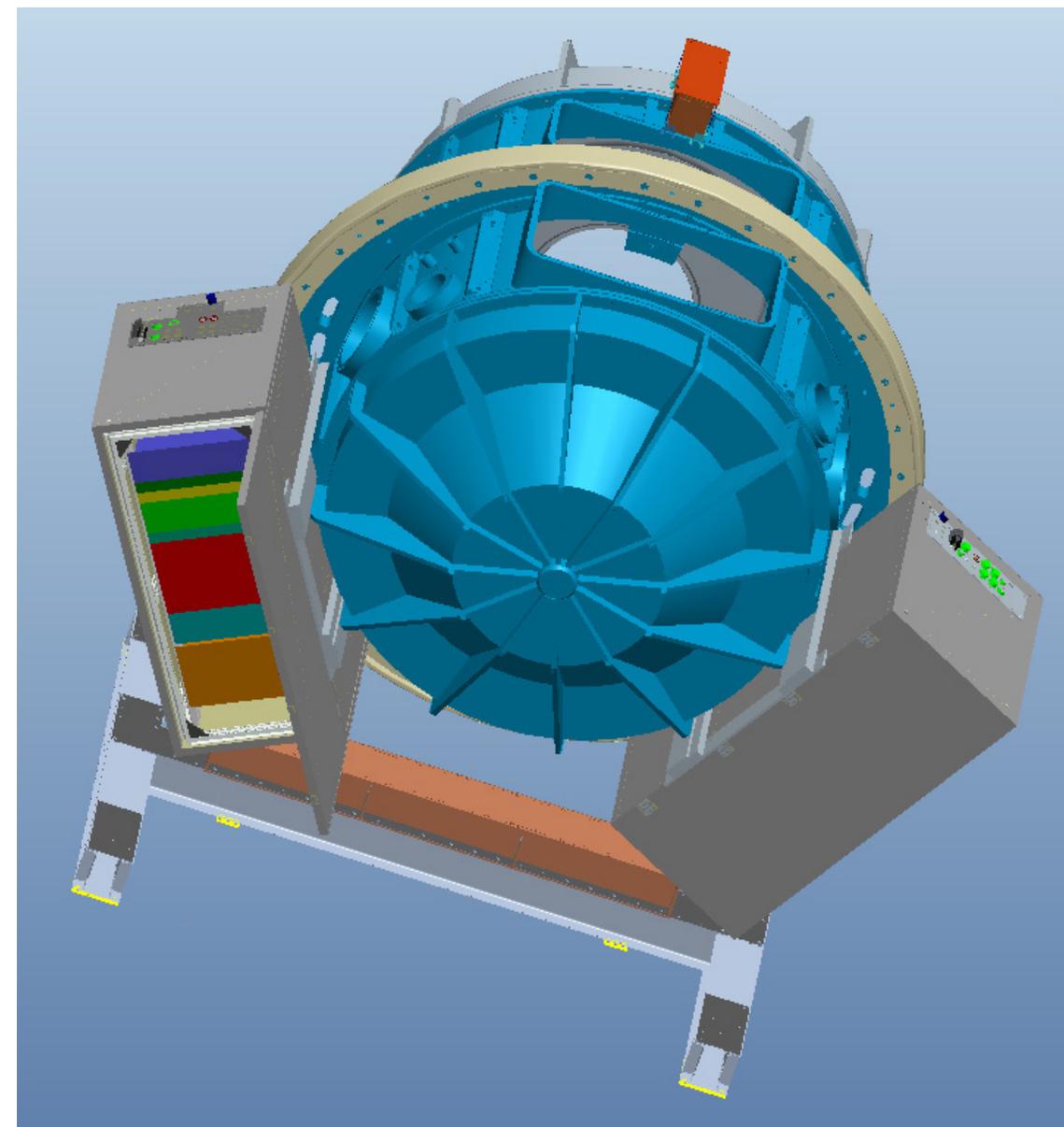
que subirlo (12 m). En los siguientes días, los equipos siguieron realizando comprobaciones a temperatura ambiente, llevando el instrumento a condiciones de criogenia y haciendo las verificaciones y ajustes finales en frío para dejar el instrumento listo para su “primera luz” en el telescopio, que tuvo lugar el 13 de junio de 2016.

EMIR obtuvo, entre otras imágenes, una del cúmulo globular NGC 5053. Para estas observaciones, apuntó a una estrella de guiado, centrada en el campo de visión del GTC con el fin de comprobar el alineado relativo del instrumento respecto del telescopio. “La estrella –explicaba **Francisco Garzón**, investigador principal del proyecto-, apareció prácticamente en el centro del detector de EMIR y, seguidamente, apuntamos a objetos cada vez más complejos, hasta que una media hora más tarde tomamos la imagen de NGC 5053. La imagen del cúmulo se mostró nítida, aunque algo desenfocada, lo que se corrigió rápidamente”, añadió. Al día siguiente, también se tomaron los primeros espectros con las lámparas de calibración.

“Nos dio una gran satisfacción ver las imágenes tras intensas semanas de trabajo”, declaró **Mary Barreto**, gestora técnica de EMIR y coordinadora de su traslado, integración y verificaciones de ingeniería. “El éxito es el resultado de un excelente trabajo conjunto entre los ingenieros y técnicos del IAC y del GTC”. “Confío en que la comunidad científica, sobre todo la española, sepa agradecer todo el esfuerzo realizado haciendo la mejor ciencia con EMIR”, concluyó Garzón.



EMIR, durante su traslado al Observatorio del Roque de los Muchachos.  
© Daniel López/IAC



Representación 3D de EMIR durante el diseño en el IAC.

## EMIR, MOMENTO DE FIN Y PRINCIPIO

El día 13 de junio de 2016 fue el principio del fin de la construcción del instrumento EMIR y también el principio del fin por el que se construyó. Fue un día especial, muy alejado de la imagen fría y seria que se suele tener de la ciencia. Fue un día de nervios, de ajustes y de preparación sobre lo que ya se llevaba ajustando y preparando durante dos semanas en telescopio y meses en la sala de AIV (*Assembly, Integration and Verification*) del Instituto de Astrofísica de Canarias. Semanas y meses en los que dos decenas de personas, entre técnicos, ingenieros y científicos, revisaron y afinaron la precisa mole de seis toneladas cuya función consiste en detectar el tenue calor de las estrellas y descomponerlo en espectros que permitirán desvelar de qué están compuestas y hacia dónde se dirigen en su evolución. Para ello, a los mecanismos que se esconden en la entraña oscura y fría se les exige precisiones de micras en sus movimientos y posicionado; un mastodonte de alta tecnología domado por un software que orquesta los movimientos de los elementos opto-mecánicos para, en coordinación con el telescopio, acompañar a las estrellas en sus interminables danzas.

Atrás había quedado el monótono latido de los compresores que durante meses había acompañado a ingenieros y científicos en la sala de AIV; dentro de la enorme nave sin ventanas, el tiempo transcurría en base a los continuos ajustes y las pruebas que se realizaban bajo la tenue iluminación de las pantallas de los ordenadores. Ese latido, parte del sistema de refrigeración que mantienen la temperatura dentro del criostato a 70 K para evitar que el propio calor de los componentes ciegue al instrumento, ahora resuena en el vientre del mayor telescopio del mundo, el GTC: lejos de la sala de control donde el personal se empieza a arremolinar sobre el IP (Investigador Principal), que sentado frente a una de las consolas de control se prepara, nervioso, para ese momento de fin y principio.

El gigantesco telescopio, dirigido por los operadores, ya ha adquirido el objeto y lo sigue, depositándolo en el foco para que EMIR lo recoja. En la pantalla de las cámaras de adquisición y guiado se puede ver una estrella congelada por el delicado fluir del telescopio. EMIR ya está configurado, listo para tomar imagen; los cuellos de

los que están en segunda línea se estiran y en la tercera fila unos se ponen de puntillas mientras otros intentan ver la pantalla principal entre el bosque de gente que tienen delante.

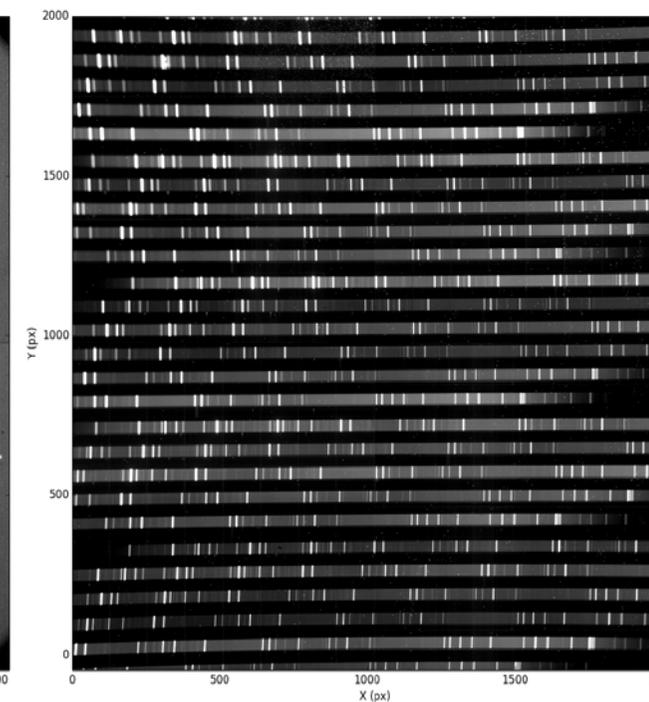
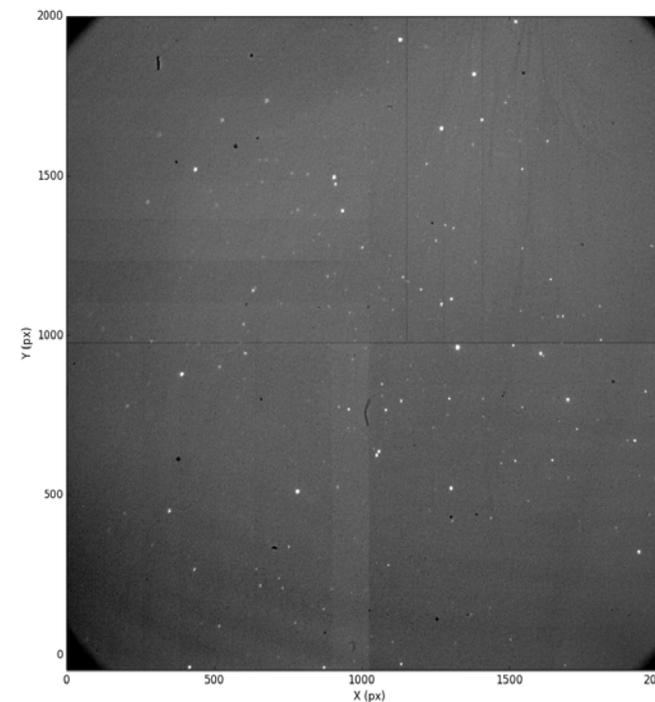
El último comando se ejecuta y... los segundos pasan; los fotones llueven sobre el detector tras terminar el viaje rectilíneo doblándose y enredándose a través de la óptica del telescopio e instrumento.

Impasible ante la expectación de los presentes, el ordenador, ignorando la tensión que se palpa en el ambiente, notifica fríamente que la imagen ha sido almacenada en disco. Es hora de ver el resultado.

El tecleo retumba en la sala repleta de silencio y... la imagen aparece en pantalla. La respiración contenida se libera en hurras y nerviosas risas que se confunden con los aplausos y las exclamaciones de alegría. Las estrellas del cúmulo globular NGC 5053 aparecen nítidas en el monitor. La sala es un ir y venir de personas que se acercan a ver, a felicitar y ser felicitado; a comentar lo bien que ha salido, como si la seguridad que una cuidadosa planificación había insuflado al equipo durante semanas hubiese sido tensada de tal manera en los últimos minutos que hacía necesario reafirmar ese buen trabajo repitiendo una y otra vez lo excelente del resultado. Aquella imagen era como una palmada en la espalda que recompensaba el esfuerzo de tantos y tantas.

Después, brindis, discurso y descanso. "Mañana será otro día -pensé- en el que se continuará caracterizando y haciendo mejoras para que en seis meses se pueda ofrecer el uso del instrumento a la comunidad científica en general; días que se difuminarán en la rutina". Pero ese día, 13 de junio, quedará grabado en la memoria como algo especial, el día en que el enorme ojo de EMIR se abrió y vio la luz por primera vez.

PABLO LÓPEZ,  
responsable de software de EMIR



A la izquierda, primera imagen tomada con EMIR del cúmulo globular NGC 5053 en el filtro J.  
© GTC.

A la derecha, los primeros espectros de EMIR con las lámparas de calibración.  
© GTC.



El equipo vinculado con EMIR celebrando la primera luz del instrumento. © Pablo López, IAC

## ALGUNOS RESULTADOS CON EMIR

### TELURIO Y BROMO EN NEBULOSAS PLANETARIAS

La obtención de espectros en el infrarrojo cercano en el GTC mediante el instrumento EMIR permitió identificar la presencia de elementos químicos pesados como el telurio y el bromo en nebulosas planetarias. Debido a que la formación de estos elementos se produce durante las etapas finales de la vida de una estrella, su investigación nos ayuda a comprender mejor la síntesis de elementos pesados en el Universo.

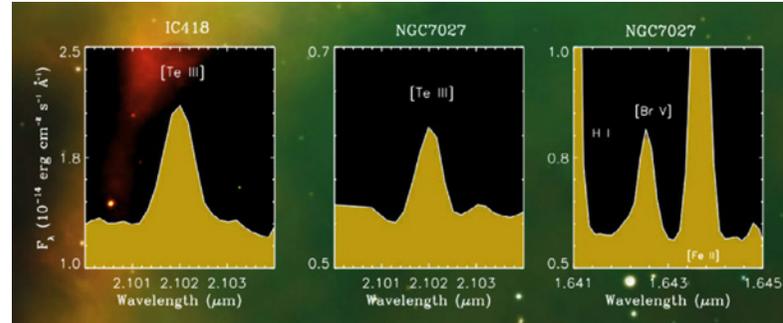
#### REFERENCIA:

-Madonna, S.; Bautista, M.; Dinerstein, H. L.; Sterling, N.C.; García-Rojas, J.; Kaplan, K. F., ... y Garzón, F. (2018). "Neutron-capture Elements in Planetary Nebulae: First Detections of Near-infrared [Te III] and [Br V] Emission Lines", *The Astrophysical Journal Letters*, 861(1), L8.

### A TODO GAS: POTENTES VIENTOS PRODUCIDOS POR UN AGUJERO NEGRO SUPERMASIVO

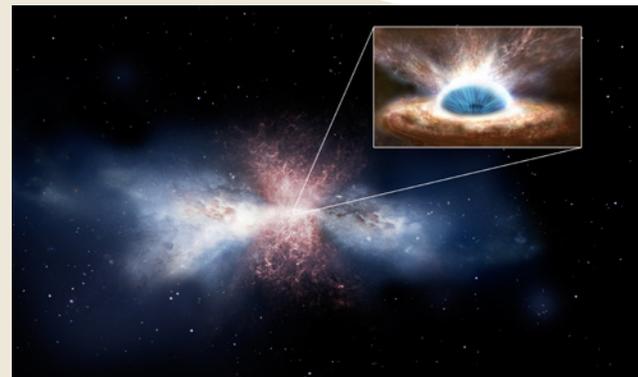
Los agujeros negros supermasivos que se encuentran en el centro de muchas galaxias parecen tener una influencia fundamental en la evolución de las mismas. Esto ocurre durante una fase en la que el agujero negro está consumiendo material de la galaxia donde reside a un ritmo muy elevado, haciéndose cada vez más pesado. Durante esta fase se dice que la galaxia contiene un núcleo activo (o AGN, por sus siglas en inglés).

El efecto que esa actividad nuclear tiene en la galaxia anfitriona es lo que se conoce como retroalimentación del AGN, y una de sus manifestaciones son los vientos: se trata de gas del centro de la galaxia que está siendo empujado hacia fuera por la energía que libera el núcleo activo. Estos vientos pueden alcanzar velocidades de hasta miles de km/s y en el caso de los AGN más energéticos, como son por ejemplo los cuásares, pueden llegar a "vaciar" de gas el centro de las galaxias, impidiendo así la formación de nuevas estrellas. Se ha demostrado que la evolución de la formación estelar a nivel cosmológico no se puede explicar sin la existencia de un mecanismo que la regule.



Líneas de telurio y bromo detectadas por primera vez a partir de espectros con EMIR  
© Madonna et al. 2018.

Para el estudio de estos vientos en cuásares se ha utilizado EMIR en el GTC. Este instrumento estudia los objetos más fríos y distantes del Universo analizando la luz infrarroja. Los datos que ha recogido desde entonces han servido para producir varios artículos científicos, el último de los cuales es un estudio sobre el cuásar oscurecido J1509+0434, publicado en la revista *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters* y elaborado por un equipo internacional que lidera la investigadora del IAC **Cristina Ramos Almeida**. Este cuásar se



Simulación artística. Los vientos del agujero negro barren el gas de las galaxias.  
© ESA/ATG medialab

encuentra en el Universo Local y es un análogo de los cuásares más distantes (mucho más numerosos) en los cuales la retroalimentación del AGN debía estar afectando de forma drástica a la formación de nuevas estrellas.

"EMIR nos ha permitido estudiar los vientos de gas ionizado y molecular de este cuásar haciendo uso del rango infrarrojo. Este análisis es muy importante porque no siempre presentan las mismas propiedades, lo cual nos dice mucho sobre cómo se producen esos vientos y cómo afectan a sus galaxias anfitrionas", explica Ramos Almeida. El estudio de éste y otros cuásares locales nos permitirá entender qué les estaba pasando a las galaxias cuando eran más jóvenes y estaban aún formando las estructuras que vemos hoy en día.

Basándose en los nuevos datos obtenidos con EMIR, el equipo ha descubierto que el viento ionizado es más rápido que el molecular, llegando a alcanzar velocidades de hasta 1.200 km/s. Sin embargo, sería el viento molecular el que estaría vaciando las reservas de gas de la galaxia (hasta 176 masas solares por año). "Nuevas observaciones obtenidas con ALMA nos permitirán confirmar esta estimación", señala **José Acosta Pulido**, investigador del IAC y coautor del trabajo.

El siguiente paso es observar una muestra completa de cuásares oscurecidos cercanos con EMIR para caracterizar sus vientos ionizados y moleculares. También se investigarán las poblaciones de las galaxias anfitrionas, con el objetivo de ver si los vientos más extremos son los que han afectado más significativamente a las estrellas de sus galaxias anfitrionas. Esto permitiría confirmar de manera directa el efecto de la retroalimentación del AGN sobre la evolución de las galaxias.

#### REFERENCIA:

-Ramos Almeida, C.; Acosta-Pulido, J.A.; Tadhunter, C.N.; González-Fernández, C.; Ciccone, C.; Fernández-Torreiro, M. (2019). "A near-infrared study of the multi-phase outflow in the type-2 quasar J1509+0434". *MNRAS: Letters*, slz072.



OSIRIS + EMIR. Imágenes de comparación entre el visible e infrarrojo del par de galaxias Arp 271. Primera imagen: composición a color con datos de OSIRIS en las bandas gris. Segunda imagen: composición de color con datos de EMIR en las bandas JHK. Tercera imagen: combinación de todas las imágenes tomadas con OSIRIS+EMIR. Se observa que en el infrarrojo cercano se pueden detectar las estrellas más frías y ocultas por las nubes y gas de las galaxias en longitudes de onda visibles.

# El desafío de las bajas temperaturas y la evolución tecnológica del IAC

Desde sus orígenes, el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) ha desarrollado instrumentos específicos dedicados a la observación en el rango infrarrojo del espectro electromagnético. Por sus características, estos instrumentos necesitan funcionar a temperaturas extremadamente bajas, lo que convierte este campo (instrumentación criogénica) en todo un desafío (criostatos, estructuras de soporte, monturas de lentes y mecanismos). Cada nuevo proyecto ha supuesto un avance tecnológico considerable respecto al anterior, con la consiguiente necesidad de mejorar, junto con las técnicas de gestión, las instalaciones de fabricación, montaje, integración y verificación en el IAC, para adaptarse a instrumentos cada vez más grandes y complejos.

para objetos en reposo, tales como galaxias cercanas, aparece en una longitud de onda roja) se observa en el infrarrojo, dentro del rango espectral cubierto por LIRIS. Esto nos da una idea de cómo se formaban las estrellas en las galaxias cuando el Universo tenía la mitad de su edad actual.

EMIR, en funcionamiento observacional desde julio de 2016, nos permite mirar hacia atrás y mucho más lejos en el Universo, hacia la época en la que las galaxias se acababan de formar y eran, por tanto, muy jóvenes.

De los tres instrumentos se amplía información en otros artículos de esta revista.

## INSTALACIONES

Desde la inauguración de la actual Sede del IAC, en La Laguna (Tenerife), en junio de 1985, la evolución de las instalaciones para fabricación, montaje, integración y verificación del IAC ha estado estrechamente vinculada a las necesidades de los proyectos desarrollados (en particular, los relacionados con los Laboratorios y con el Taller de Mecánica). Además, el hecho de estar ubicado en una región ultra periférica europea, donde hay escasa presencia de la industria, ha incidido en la necesidad de que el IAC cuente con sus propias instalaciones completas.

Las más relevantes utilizadas en el desarrollo de los instrumentos descritos en este trabajo son el Taller de Mecánica, el Laboratorio de Metrología Dimensional, el Taller de Electrónica, el Laboratorio de Óptica, el Laboratorio de Integración y Verificación Mecánica, el Laboratorio de Imagen y Sensores de Astronomía (LISA) y la Sala AIV. *(Más información en las siguientes páginas).*

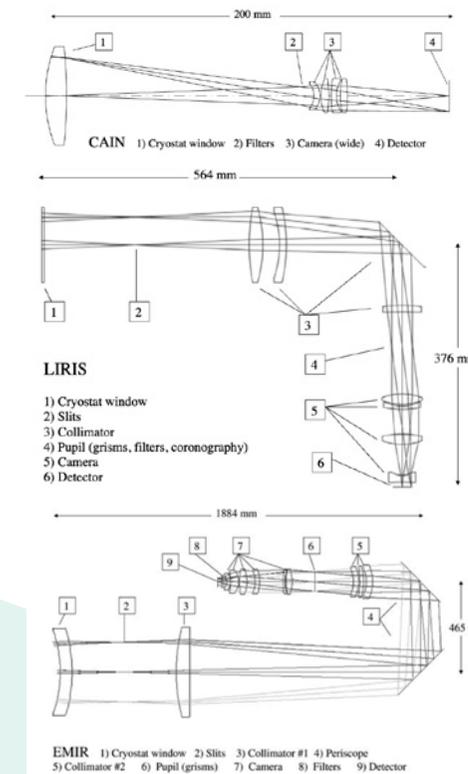
PABLO REDONDO,  
ingeniero y responsable técnico de IACTEC

REFERENCIA:  
-Caicoya, P.G.R., Cabrera, M.B., Izquierdo, P.F., Patrón, J., Sánchez de La Rosa, V. y Sanginés, F.T. (2014). "From 1.5 Meters to 10.4 Meters in 20 Years: Technological Evolution at the Instituto de Astrofísica de Canarias in the Development of Infrared Instrumentation for Terrestrial Telescopes". *Journal of Astronomical Instrumentation*, 3, 3n04. 1450005.

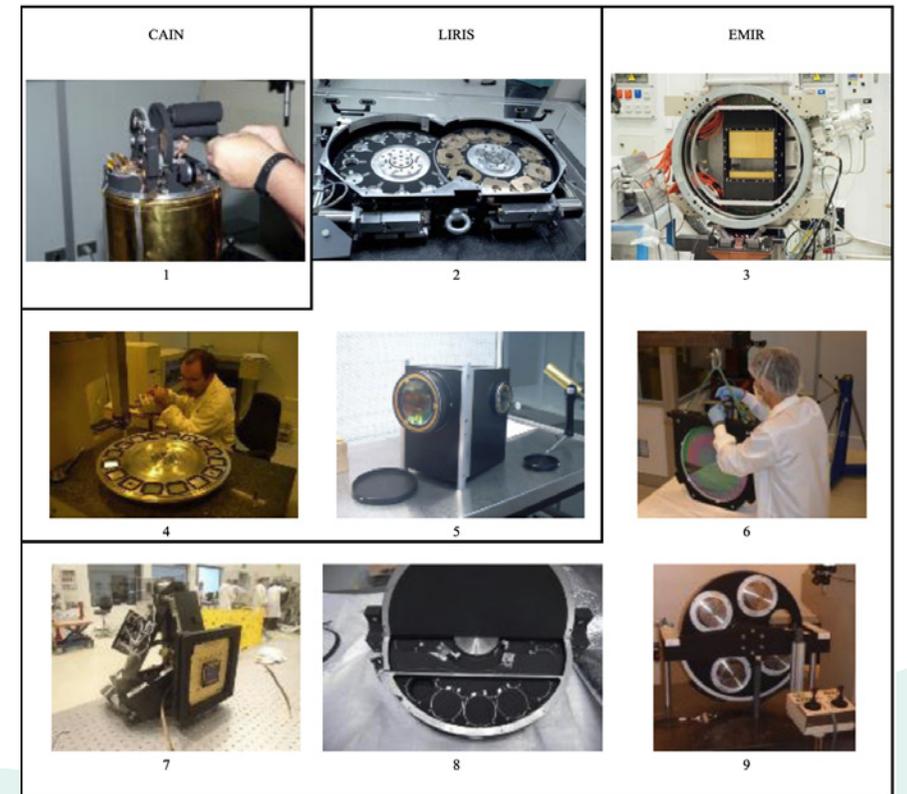
Un equipo de ingenieros y gestores de proyecto del IAC publicó en 2014 un estudio en el que se describían y comparaban los tres instrumentos más representativos en esta área por entonces instalados en telescopios de los Observatorios de Canarias: CAIN (Telescopio Carlos Sánchez, TCS, de 1,5 metros), LIRIS (William Herschel Telescope, WHT, de 4,2 metros) y EMIR (Gran Telescopio CANARIAS, GTC, de 10,4 metros), como escaparate de la evolución tecnológica del IAC en el desarrollo de este tipo de instrumentación para telescopios terrestres. Como una indicación del crecimiento en la complejidad de proyectos a lo largo del tiempo, este artículo destacaba el marco de recursos humanos disponibles, establecido por consorcios, plazos y costes asociados a los tres instrumentos.

Uno de los principales proyectos llevados a cabo con CAIN en las décadas de los ochenta y noventa fue el primer cartografiado infrarrojo a gran escala de las estrellas en el plano de la Vía Láctea, el cual mostró que la barra de nuestra galaxia presenta una geometría muy diferente de la contemplada en observaciones anteriores.

Un ejemplo del tipo de investigación posible utilizando LIRIS fue el estudio de galaxias lejanas con formación estelar, en particular aquellas que tienen un desplazamiento al rojo entre 0,7 y 1. Este estudio aprovechaba el hecho de que, con esos desplazamientos hacia el rojo, la emisión del hidrógeno ionizado (que,



Esquemas de CAIN, LIRIS y EMIR. © IAC.



CAIN (1), ruedas centrales LIRIS (2), unidad de hendidura configurable EMIR (3), rueda de hendiduras LIRIS (4), colimador LIRIS (5), primera lente colimadora EMIR (6), unidad de traslación del detector y conjunto detector EMIR (7), unidad de filtros EMIR (8), unidad de grismas EMIR (9). © Pablo Redondo (IAC).

## DISEÑO, DESARROLLO Y FABRICACIÓN DE SISTEMAS CRIOGÉNICOS Y DE VACÍO

La observación astronómica en el infrarrojo requiere el uso de sistemas criogénicos donde se enfría el detector (sensor infrarrojo) y todo el sistema óptico que acomoda la luz desde el telescopio hasta el sensor (lentes, espejos, mecanismos, estructuras, etc.), a temperaturas del orden de 200 grados bajo cero en un entorno de alto vacío. El diseño e integración de los distintos componentes ópticos, mecánicos y electrónicos que deben trabajar conjuntamente a temperaturas tan bajas y en vacío, requiere unos conocimientos técnicos muy especializados. El IAC dispone de una amplia experiencia en el desarrollo de instrumentación infrarroja, tanto con enfriadores de ciclo abierto como de ciclo cerrado o de ciclo híbrido. En este último caso, se suele utilizar el nitrógeno líquido para preenfriar todo el instrumento, y un enfriador mecánico para mantenerlo en condiciones criogénicas. La especialización consiste en dominar las técnicas de diseño y fabricación de cámaras de vacío, sistemas de enfriamiento, pantallas de radiación y criomecanismos, y

el diseño de sistemas opto-mecánicos, estructuras y bancos ópticos criogénicos y análisis termomecánicos. Las técnicas de criogenia y vacío son cada vez de mayor interés industrial por sus aplicaciones en otros campos, como medicina, energía y medioambiente.



Vista trasera del instrumento EMIR en GTC con ingenieros trabajando en el sistema criogénico. © Pablo López (IAC)

# INSTALACIONES DEL IAC para el desarrollo de instrumentos infrarrojos



Vista de una parte del Taller de Mecánica con técnicos trabajando. © A.L. Aldai/IAC

## TALLER DE MECÁNICA

En el Taller de Mecánica se fabrica, verifica y realiza el montaje de las piezas y partes mecánicas requeridas por los distintos proyectos de desarrollo instrumental del IAC. Su personal también da soporte de fabricación y ajuste mecánico a los telescopios del Observatorio del Teide, en Tenerife, y del Roque de los Muchachos, en La Palma. Adicionalmente, el taller puede dar servicio a empresas públicas y privadas en trabajos relacionados con la I+D+i o en aquellas tareas o aspectos no fácilmente realizables por las empresas del sector. El Taller de Mecánica está preparado para la fabricación de unidades o series medias/cortas de piezas que normalmente requieren una alta precisión. La fabricación puede realizarse en materiales metálicos, acero, acero inoxidable, aleaciones de aluminio, bronce... y en una amplia variedad de plásticos, según las necesidades. El taller tiene una superficie de 668 m<sup>2</sup> dividida en varias zonas: zona de máquina herramienta, donde encontramos centros de mecanizado y torno de control numérico, fresadoras y tornos convencionales; zona de máquina auxiliar, donde se dispone de plegadora, curvadora, sierra sin fin, taladros, etc; zona de pintura, que cuenta con cabina-horno; zona de soldadura, constituida por máquinas de soldadura TIG, MIG, Plasma y Oxiacetilénica (con personal homologado para soldadura en acero, acero inoxidable y aluminio); zona de tratamientos térmicos y granalladora; zona de anodizado; y, por último, zona de almacenes de materiales y componentes mecánicos. El equipamiento del Taller de Mecánica ha sido financiado parcialmente por fondos FEDER.

## LABORATORIO DE METROLOGÍA DIMENSIONAL

Su finalidad principal es comprobar que las piezas fabricadas cumplen las especificaciones requeridas. Estas comprobaciones se hacen normalmente en dimensión, forma y calidad superficial. Adicionalmente, el laboratorio también es usado en ocasiones durante el proceso de montaje de componentes optomecánicos donde, gracias a los medios de medida disponibles, se puede garantizar la precisión de montaje requerida. El principal



Vista general del Laboratorio de Metrología Dimensional. © IAC

equipamiento del laboratorio consiste en varias máquinas de medir por tres coordenadas de muy alta precisión, por contacto o sin contacto. El laboratorio dispone además de una máquina de prerreglaje de herramientas, rugosímetro, calas patrón, calibres de altura, micrómetros, centradores, comparadores, calibres, etc., todo ello en un ambiente de temperatura y humedad controladas y registradas.

## EL LABORATORIO DE INTEGRACIÓN Y VERIFICACIÓN MECÁNICA

Gestionado por el Departamento de Mecánica, proporciona las infraestructuras básicas y específicas necesarias para el montaje, integración y verificación de los sistemas mecánicos de tamaño medio que se desarrollan en el Área de Instrumentación. Este laboratorio es un recinto de 42 m<sup>2</sup> acondicionado para el trabajo con dispositivos y equipos mecánicos, dotado con variedad de equipos de medida y prueba de propósito general, y con los servicios habituales en



Vista general del Laboratorio de Integración y Verificación Mecánica. © IAC

un laboratorio de investigación y desarrollo tecnológico. Posee instalaciones de aire acondicionado, aire comprimido, red informática local, red eléctrica de corriente trifásica, monofásica e ininterrumpida, red telefónica, sistema de control de acceso, sistemas de seguridad, etc. Cuenta con un conjunto de elementos específicos para la integración, medida y verificación mecánica, como son calibres, criostatos, bombas de vacío, sistemas de adquisición de datos de temperatura y presión, torquímetros, equipo de medidas submicrométricas, equipo de medida y análisis de vibraciones, etc. Y como infraestructura auxiliar, tiene múltiples herramientas mecánicas, bancos de trabajo, estanterías, carros de almacenamiento y elementos de manipulación.

## LABORATORIO DE ÓPTICA

El Laboratorio de Óptica es una sala limpia, ISO 8 (clase 100.000), de 160 m<sup>2</sup>, en la cual están controladas tanto la temperatura como la humedad. Estas condiciones son necesarias para garantizar las actividades que se realizan y posibilitar



Vista general del Laboratorio de Óptica. © IAC

la perfecta conservación de los componentes e instrumentos. El laboratorio está equipado con una instrumentación específica y una amplia variedad de componentes de propósito general como lentes, sistemas ópticos, láseres, detectores ópticos e infrarrojos, filtros, fuentes de luz, etc. También se dispone de laboratorios de fibras ópticas y de recubrimientos ópticos.

## LABORATORIO DE IMAGEN-SENSORES PARA ASTRONOMÍA (LISA)

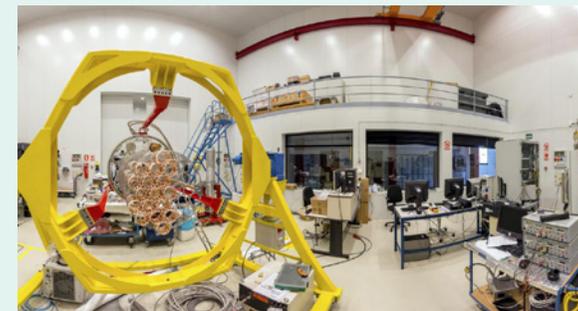
Es un laboratorio de 55 m<sup>2</sup> aproximadamente, dedicado a la caracterización de detectores astronómicos bajo condiciones controladas. Dispone de instalaciones de aire comprimido, aire acondicionado, refrigeración externa para intercambiadores de calor de gran



Vista general del Laboratorio de Imagen-Sensores para Astronomía (LISA). © IAC

## SALA DE ARMADO, INTEGRACIÓN Y VERIFICACIÓN (AIV)

Es una infraestructura de uso común del IAC para la realización del montaje y pruebas de instrumentos que por sus características de tamaño requieren grandes espacios y condiciones de limpieza. Internamente, esta sala está dividida en tres zonas: almacén, rotadores y laboratorio, todas ellas con una altura de 10 m. La zona de laboratorio tiene una superficie de 125 m<sup>2</sup> y, dentro de ella, hay una bancada independiente del resto del edificio, para evitar vibraciones externas, que tiene unas dimensiones de 10x1,2 m<sup>2</sup> con un rectángulo de 2,5x2,3 m<sup>2</sup> en el centro, y donde se pueden realizar montajes ópticos de alta estabilidad. El nivel de limpieza de la sala es de clase 8 y dispone de temperatura y humedad controladas. La zona de rotadores tiene una superficie de 220,5 m<sup>2</sup> y en ella hay dos bancadas independientes de 8x7 m<sup>2</sup> aisladas del resto del edificio. En una ellas, se encuentra instalado un simulador del rotador del foco Nasmyth del Gran Telescopio Canarias (GTC). Esta infraestructura se utiliza para comprobar el correcto enganche de los instrumentos previamente a su traslado a GTC y, sobre todo, para verificar que su comportamiento frente a la rotación que se va a producir en el telescopio durante la observación, es el correcto. Es decir, no se producen flexiones o desalineamientos indeseados que afecten a la calidad de la imagen final obtenida. Esta zona, al igual que el laboratorio, tiene un nivel de limpieza de clase 8 y controlada su temperatura y humedad. La zona de almacén tiene una superficie de 154,5 m<sup>2</sup> y, además de servir como almacén de propósito general, también aloja a la planta de aluminizado. Todas las zonas tienen una altura de 10 m y disponen de un puente grúa de 8 toneladas que permite el traslado de cargas de una sala a otra. El suelo de las zonas de laboratorio y de rotadores tiene una red de arquetas comunicadas entre sí y con los cuadros eléctricos, las tomas de aire comprimido, el circuito de refrigeración, la telefonía y datos, con la finalidad de poder llevar todos estos servicios a cualquier parte de estas zonas por debajo del suelo. En toda la sala existe alimentación trifásica, monofásica, UPS, y se dispone de un grupo electrógeno que garantiza el suministro eléctrico en caso de fallos o cortes por mantenimiento. La sala AIV y parte de su equipamiento ha sido financiado por fondos FEDER.



Vista panorámica de una parte de la Sala de Armado, Integración y Verificación (Sala AIV). © IAC

caudal, corrientes monofásica y trifásica, UPS y equipamiento de uso general como microscopio, osciloscopio digital, PCs de control, etc. El laboratorio tiene dos áreas de trabajo, una dedicada a la caracterización en longitudes de onda visibles y otra al infrarrojo, ambas dotadas con todo el equipamiento técnico necesario: mesas y componentes ópticos específicos, radiómetro, cuerpo negro, fuentes de luz, criostatos, sensores, etc. junto con el equipo electrónico y software para el control y adquisición de datos de los sensores y detectores bajo estudio, y el procesado y análisis posterior de los datos. El equipamiento de este laboratorio ha sido financiado parcialmente por fondos FEDER.

## TALLER DE ELECTRÓNICA

El objetivo del Taller de Electrónica es la fabricación y montaje de los equipos y sistemas electrónicos necesarios para los proyectos científicos en los que participa el IAC. Asimismo, da servicio a empresas y otros organismos desarrollando equipos y aplicaciones electrónicas específicas no disponibles comercialmente. Para el diseño de placas y componentes electrónicos, los técnicos disponen de estaciones de trabajo con aplicaciones informáticas específicas para la realización de esquemas electrónicos detallados, el diseño de circuitos impresos (PCB) y la



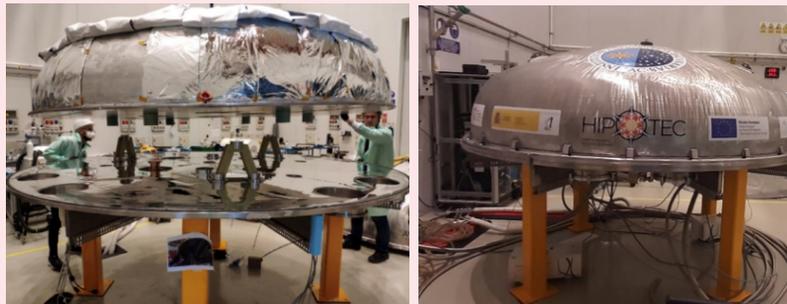
Vista general del Taller de Electrónica con un técnico en una estación de trabajo. © IAC

elaboración de documentación técnica. Para la realización de los trabajos de montaje existen cuatro puestos totalmente equipados con soldadores, fuentes de alimentación, multímetros, estaciones de filtración de humos, así como la herramienta e instrumentación necesaria para la construcción, ensamblado, cableado, montaje de componentes y verificación de módulos electrónicos. Como infraestructura auxiliar, se dispone de un pequeño taller de mecanizado destinado a la realización de taladros, cortes, lijados, etc. en los módulos y cajas que alojan los componentes electrónicos. También se realizan trabajos con microcontroladores, programación de autómatas, inspección de circuitos, reparación y montaje con tecnología de montaje superficial (SMD).

## Desarrollo actual de INSTRUMENTACIÓN INFRARROJA EN EL IAC

Desde su creación, el IAC ha tenido entre sus objetivos el desarrollo de instrumentación astrofísica. Para ello, el centro cuenta con todos los medios y capacidades necesarias y está dotado con el más moderno equipamiento y múltiples laboratorios especializados. La variedad de proyectos en los que ha participado es muy amplia, desde proyectos espaciales hasta la construcción de telescopios, pasando por todo tipo de instrumentos, tanto en longitudes de onda visibles, como infrarrojas o de microondas.

La astronomía infrarroja es de gran importancia ya que revela estados fríos de la materia, el Universo oscuro a longitudes de onda visibles y objetos a alto desplazamiento al rojo. Por ello, la instrumentación para detectar y analizar la luz en el rango infrarrojo del espectro es uno de los campos de conocimiento del Área de Instrumentación del IAC. El diseño y construcción de cámaras y espectrógrafos infrarrojos requiere de tecnologías del alto vacío y criogenia, que abarcan las especialidades de la ingeniería mecánica, óptica y electrónica, principalmente. La integración y funcionamiento de mecanismos y dispositivos en criogenia es especialmente compleja y exige unos conocimientos y equipamiento altamente especializados.



**CRIOSTATO HIPOTEC**

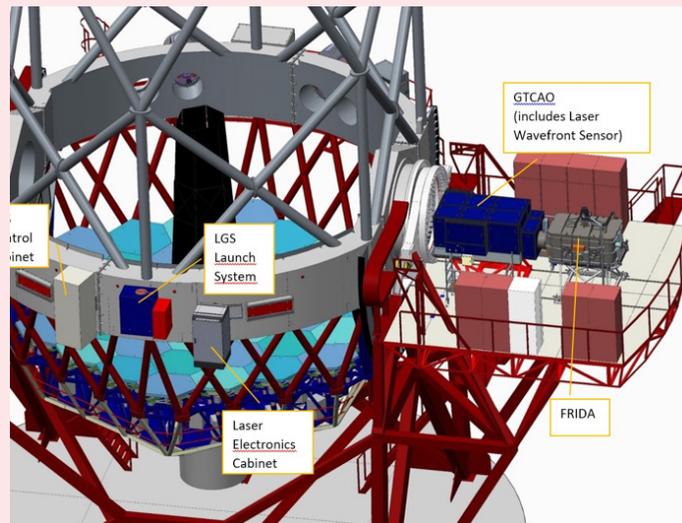
El IAC dispone de un criostato de grandes dimensiones (aprox. 3,5 m de diámetro), al que se denomina HIPOTEC y que permite realizar pruebas en criogenia de sistemas de grandes dimensiones, como son los instrumentos para los telescopios gigantes de 10-40 m. El primer sistema que va a hacer uso de esta infraestructura será la pre-óptica de HARMONI. En la imagen del panel (1) los ingenieros del IAC trabajan en el ensamblaje de las partes que constituyen el gran criostato. En el panel (2) se muestra el criostato de gran tamaño HIPOTEC en su localización provisional en la sala de AIV del IAC.

El IAC tiene una larga historia de participación internacional en este tipo de instrumentación y en el pasado ha desarrollado, para telescopios de los Observatorios de Canarias, la mayor parte de los instrumentos infrarrojos de los que se habla en este número de *Paralajes*. Muchos de ellos, proyectos terminados y exitosos, como lo fueron CAIN, para el TCS, LIRIS, para el WHT, y EMIR, para el GTC, en el caso de telescopios nocturnos, o de LPSP, TIP I y II y GRIS, para los telescopios solares SVST (sustituido por el SST), VTT y GREGOR (que sustituyó al GCT), así como instrumentos para el espacio, como ISOPHOT-S, para el satélite ISO, o PACS y SPIRE, para el Herschel. Además, el instrumento NIRPS se encuentra en las últimas fases del comisionado en el telescopio de 3,6 m de ESO, en el Observatorio de La Silla (Chile).

### PROYECTOS ACTIVOS

Actualmente, el IAC trabaja en más de media docena de proyectos de instrumentación infrarroja. Entre los instrumentos de tierra se encuentran los destacados en las siguientes páginas.

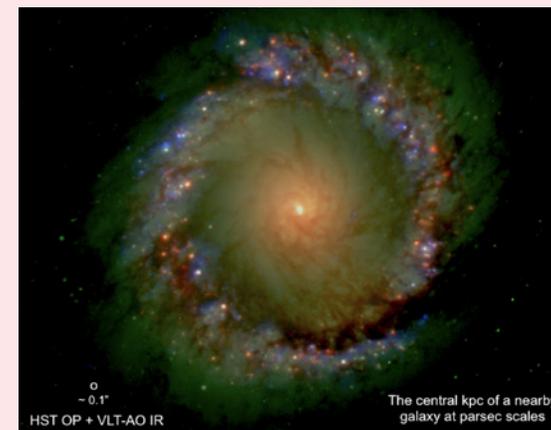
J. ALFONSO L. AGUERRI,  
coordinador del Área de Instrumentación del IAC



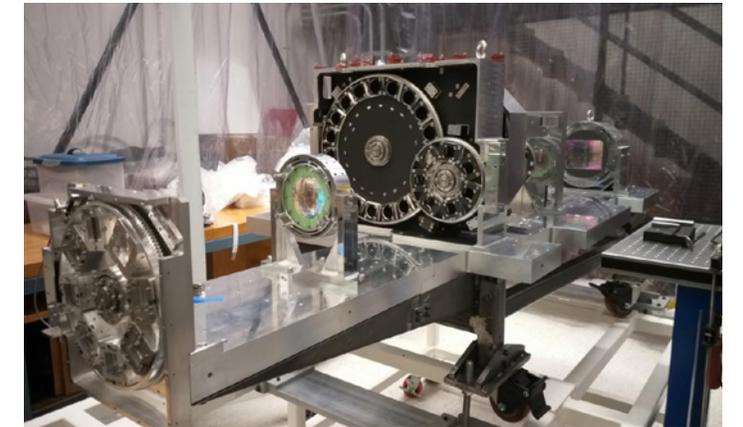
## FRIDA (inFRared Imager and Dissector for the Adaptive optics system of the GTC)

FRIDA es una unidad de campo integral IFU basada en un sistema disector de imagen mediante espejos y varias cámaras ópticas para cubrir distintas escalas espaciales que muestrean el límite de difracción del Gran Telescopio Canarias (GTC) en el rango 0,9-2,5 micras. A diferencia de todos los instrumentos instalados o previstos para este telescopio, FRIDA es el único que trabajará con una resolución espacial extrema, un factor 10-20 superior a la de los instrumentos actuales (y un factor 1,7 superior a la del telescopio espacial James Webb), llegando a distinguir detalles en imágenes astronómicas separados por 0,025 segundos de arco en una micra, 0,04 segundos de arco en dos micras, los límites de difracción de un telescopio de 10,4 m. Dispone de un rango de resoluciones espectrales en modo IFU:  $R = 5.000$  a 30.000, lo que permitirá medir velocidades de objetos estelares y cúasares de 10 km/s.

Una estrecha colaboración entre el equipo de FRIDA del IAC y la comunidad científica del GTC ha permitido identificar programas y estrategias de observación claves para este instrumento. Como punto de partida, se ha seleccionado el estudio a gran escala de la galaxia Andrómeda, la galaxia espiral más cercana a la Tierra. Esto permite que sus diferentes componentes galácticas -núcleo, disco, bulbo, brazos y halo- puedan ser estudiadas bajo escalas espaciales sin precedente. FRIDA podrá realizar un mapeado espectroscópico de regiones seleccionadas en Andrómeda con resoluciones espaciales por debajo de 0,16 pc a 2 micras. Por su proximidad, la observación de Andrómeda con FRIDA permitirá el estudio de un gran número de problemas astrofísicos, como formación estelar, función inicial de masa en cúmulos globulares, dinámica galáctica, escenarios de formación de galaxias, etc., a escalas espaciales sólo conseguidas anteriormente en nuestra galaxia y las Nubes de Magallanes.



Cámara y espectrógrafo que usará las capacidades de la Óptica Adaptativa del GTC.  
IP en IAC: **Almudena Prieto Escudero**



Alineado de la óptica de FRIDA. © IAC

Tecnológicamente, el IAC es responsable del desarrollo completo de la ingeniería del sistema, del desarrollo de control y software de alto nivel del instrumento, del sistema de adquisición de datos, de la electrónica de control del detector y la caracterización del mismo, así como del software de alto nivel para el control de mecanismos. También son responsabilidades del IAC el desarrollo de los programas necesarios para poder observar con FRIDA+GTCAO, así como los requeridos para el postprocesado de los datos finalmente obtenidos.

El IAC coordina todas estas actividades con el Gran Telescopio Canarias (GTC) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).



Galaxia de Andrómeda o M31. © NASA/JPL-Caltech/Karl D. Gordon, Universidad de Arizona

"Un anillo de perlas en el infrarrojo". Imagen tomada en el infrarrojo usando Óptica Adaptativa en el telescopio VLT (Very Large Telescope), de ESO, en Chile. Cada perla en el anillo es una región donde están naciendo nuevas estrellas: vida en el centro de la galaxia NGC 1097. Todas las perlas están girando al unísono, a grandísimas velocidades alrededor de un potente agujero negro que deslumbra en el centro. La imagen es parte del proyecto PARSEC del IAC (IP: Almudena Prieto), una investigación en múltiples longitudes de onda del parsec central de las galaxias más cercanas del Universo Local con técnicas de alta resolución espacial. Su objetivo es aislar observacionalmente el espectro nuclear de una galaxia y confirmar la universalidad de un agujero negro en el centro utilizando conjuntamente varios telescopios con Óptica Adaptativa, como será el caso del GTC con FRIDA.

# MIRADAS

(Mid-resolution InFRARED  
Astronomical Spectrograph)

MIRADAS es un espectrógrafo multiobjeto con la capacidad para observar hasta 20 fuentes gracias a 20 brazos articulados provistos de un espejo, a modo de sonda, que patrullan un sector dentro de un círculo de 5 minutos de arco en el plano focal del GTC. Operará en el rango infrarrojo de 1 a 2,5 micras con una resolución espectral de 20.000. La combinación de la capacidad colectora del GTC y de la espectroscopía multiobjeto de resolución media-alta en el infrarrojo cercano de MIRADAS lo hacen único, con una eficiencia observacional de más de un orden de magnitud mayor que las actuales capacidades con las que cuentan los telescopios de clase 10 metros.

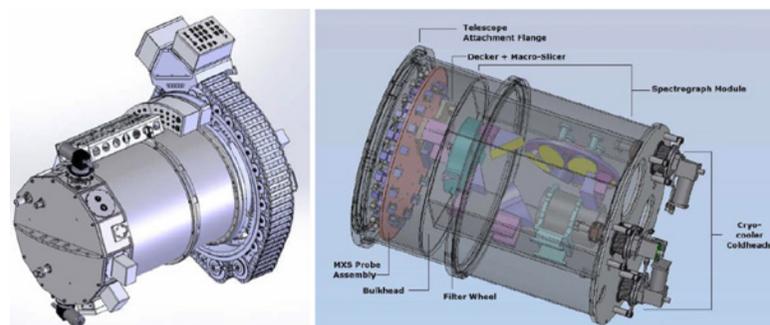
El equipo científico de MIRADAS ha identificado cuatro casos clave de estudio, como son las estrellas masivas en la Vía Láctea; el estudio de la dinámica de las reacciones químicas en el interior de la Vía Láctea; los "ladrillos" de la evolución de las galaxias a desplazamiento al rojo intermedio; y la espectropolarimetría infrarroja como una nueva ventana para la astrofísica estelar.

La contribución tecnológica del IAC se centra en el desarrollo del sistema de control del instrumento, donde también participan otras instituciones. MIRADAS sigue los estándares de GTC de forma que se garantiza una total integración con el telescopio. El sistema de control se basa en una arquitectura distribuida, de acuerdo con el modelo de componentes de GTC, desarrollada en el lenguaje de programación C++ y que se ejecuta en diferentes ordenadores usando el middleware CORBA. El sistema de control está compuesto por el control de mecanismos, la adquisición de datos, el control de alto nivel, la reducción de datos, el calculador de tiempo de exposición y el agente de preprocesado. En su desarrollo se intenta aprovechar la experiencia previa y los componentes ya existentes en los sistemas de control de otros instrumentos para el GTC, como el espectrógrafo EMIR.

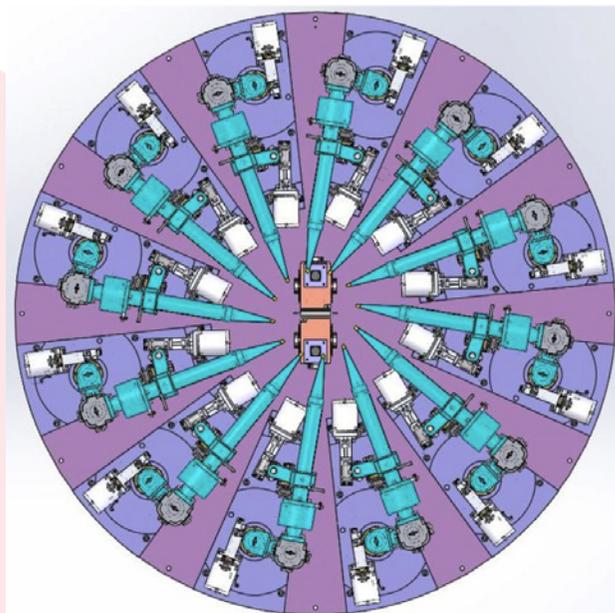
El Consorcio MIRADAS está formado por la Universidad de Florida (EEUU), la Universidad de Barcelona, la Universidad

Espectrógrafo infrarrojo de resolución intermedia para el GTC.  
IP en IAC: **Francisco Garzón López**

Complutense de Madrid, el Institut de Física d'Altes Energies, el Institut d'Estudis Espaciales de Catalunya, y el IAC. Además, participan investigadores individuales de la Universidad Nacional Autónoma de México.



Descripción general del diseño conceptual de MIRADAS. © Consorcio MIRADAS



El diseño del plano focal MIRADAS con sus 12 brazos de recogida desplegados para objetos separados. © Consorcio MIRADAS

# HARMONI

(High Angular Resolution Monolithic  
Optical and Near-Infrared Integral Field  
Spectrograph)

HARMONI es un espectrógrafo de campo integral y alta resolución angular de primera luz para el ELT (*Extremely Large Telescope*), telescopio de 39 m de diámetro que se está construyendo en Cerro Armazones (Chile). Proporcionará 31.008 espectros de un campo rectangular dividido en 152x204 posiciones espaciales. La preóptica del instrumento, desarrollada en el IAC, permite seleccionar entre cuatro escalas espaciales (30x60, 20x20, 10x10 o 4x4 mas2). El espectrógrafo operará en el rango óptico e infrarrojo cercano (0,45-2,45 micras), utilizando 11 bandas espectrales distribuidas en tres resoluciones (3.300, 7.200 y 17.500). Dispone de un sistema de óptica adaptativa de plano conjugado simple (SCAO) y de un sistema de óptica adaptativa por tomografía láser (LTAO) que permiten compensar los efectos de la turbulencia atmosférica para obtener alta resolución angular. Podrá operar también sin esta compensación, es decir, limitado por *seeing*. Al tratarse de un instrumento de primera luz, estará disponible tan pronto como el ELT entre en funcionamiento.

HARMONI tiene una gran versatilidad (el usuario puede elegir entre cuatro escalas espaciales, once bandas espectrales y tres modos de compensación atmosférica), lo que permite optimizar el instrumento para diferentes observaciones, en función de la resolución angular, de la sensibilidad, del campo de visión, etc. Fue ideado como un instrumento de uso general, es decir, de interés para un amplio rango de programas científicos, cubriendo desde estudios de las galaxias más distantes o galaxias con fuerte actividad nuclear, hasta estrellas individuales en galaxias cercanas, exoplanetas en la Vía Láctea o pequeños cuerpos en nuestro sistema solar.

HARMONI tendrá importantes sinergias y complementará las capacidades de los actuales telescopios y observatorios, como por ejemplo las del interferómetro ALMA y el telescopio espacial James Webb, con una resolución angular similar al primero y una sensibilidad comparable al segundo.



Plataforma Nasmyth del ELT con los cuatro instrumentos de primera luz. MICADO tomará imágenes de alta resolución espacial del Universo en longitudes de onda del infrarrojo cercano; METIS será un generador de imágenes y espectrógrafo para el infrarrojo medio; MORFEO no es un instrumento propiamente dicho, sino un módulo de óptica adaptativa multiconjugada principalmente para MICADO; y HARMONI, el espectrógrafo de campo integral de alta resolución angular.

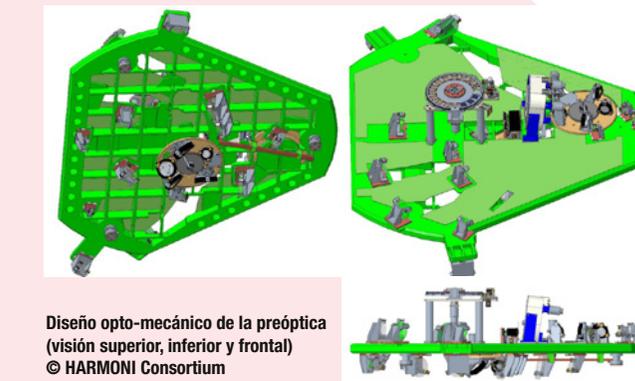
Espectrógrafo de campo integral.  
Instrumento de primera luz para el ELT.  
IP en IAC: **Begoña García Lorenzo** y **Evencio Mediavilla Gradolph**.



Representación del instrumento HARMONI © HARMONI Consortium

La contribución tecnológica del IAC en HARMONI representa aproximadamente el 14% de todo el esfuerzo de ingeniería para desarrollar el instrumento, liderando el IAC el desarrollo de la preóptica (diseño, fabricación y verificación) y la arquitectura del control electrónico de todo el instrumento. Además, científicos del IAC participan activamente en la definición y desarrollo de los casos científicos para el aprovechamiento de HARMONI integrados en el equipo científico del instrumento. Toda esta participación garantiza tiempo de observación en el ELT en las primeras etapas de su uso, una oportunidad científica única para la comunidad astrofísica española. También permite que los centros tecnológicos españoles y la industria participen en el desarrollo de este avanzado instrumento.

El IAC ha participado activamente en todas las fases de desarrollo de HARMONI, desde la propuesta inicial (en 2007), las etapas de diseño de conceptual (Fase A, 2010 y Fase delta-A, 2012-2015), pasando por la fase de diseño preliminar (2015-2018) y hasta el actual periodo de diseño final (2018-2024). HARMONI se desarrolla en el marco de un consorcio internacional dirigido por la Universidad de Oxford (IP, Reino Unido) y el Astronomical Technology Centre (UK-ATC, Edimburgo, Reino Unido), del que también forman parte la Universidad de Durham (UK), el Centre de Recherche Astrophysique de Lyon (CRAL, France), el Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM, France), el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC, España), el Centro de Astrobiología (CSIC/CAB, España), y la Universidad de Michigan (Estados Unidos).



Diseño opto-mecánico de la preóptica (visión superior, inferior y frontal) © HARMONI Consortium

# GRANCAIN

(GRAN CÁMARA INFRARROJA)

GTCOA es el sistema de Óptica Adaptativa monoconjugado que se está desarrollando para el GTC. En su primera luz constará de un sistema de estrella natural (NGS), que posteriormente se actualizará a uno de estrella de guía artificial de láser (LGS). En la actualidad, el sistema se encuentra en las últimas fases de integración y verificación (AIV) y se espera que, tras las pruebas de aceptación en el IAC, se obtenga la primera luz en telescopio durante el segundo semestre de 2023. Después de probar el sistema de Óptica Adaptativa y del telescopio con la cámara de pruebas TestCam (sólo imagen en banda J y H), GTCOA estará preparado para realizar las primeras observaciones científicas al límite de difracción con GTC, el telescopio óptico e infrarrojo de mayor diámetro del mundo.

GRANCAIN es la cámara IR provisional con funcionalidades básicas para el sistema GTCOA, que hará uso del sistema de óptica adaptativa hasta la llegada de FRIDA al telescopio.

Al ser una cámara infrarroja, este instrumento consta en esencia de un detector infrarrojo, una óptica de



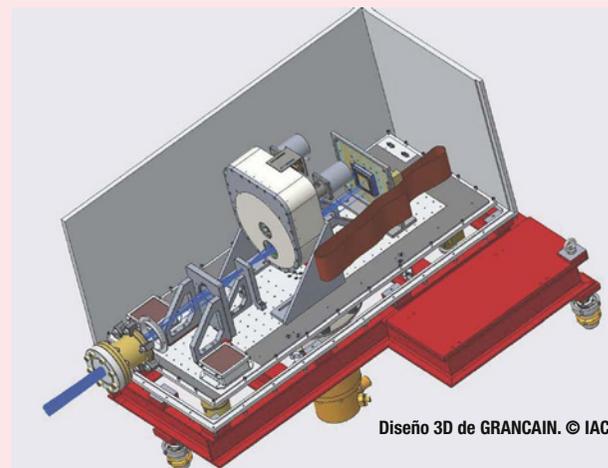
Vista de GTCOA durante las pruebas de AIV en laboratorio. © IAC

Cámara infrarroja que usará Óptica Adaptativa en el GTC.  
IP en IAC: **Víctor Sánchez Béjar**

reimaginación y un sistema de filtros intercambiables mediante una rueda. Todo ello irá montado dentro de su correspondiente criostato.



Diseño 3D del criostato de GRANCAIN. © IAC



Diseño 3D de GRANCAIN. © IAC

# ANDES

(ArmazoNEs high Dispersion Echelle Spectrograph)

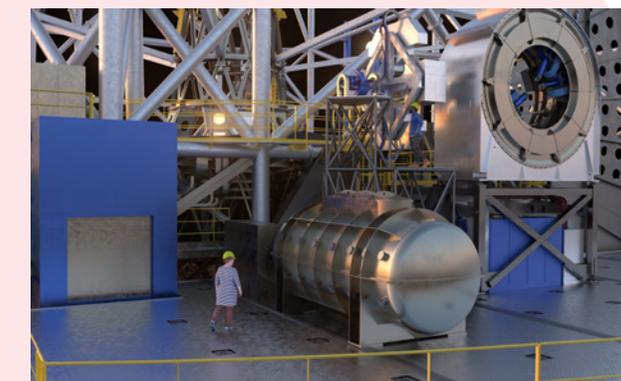
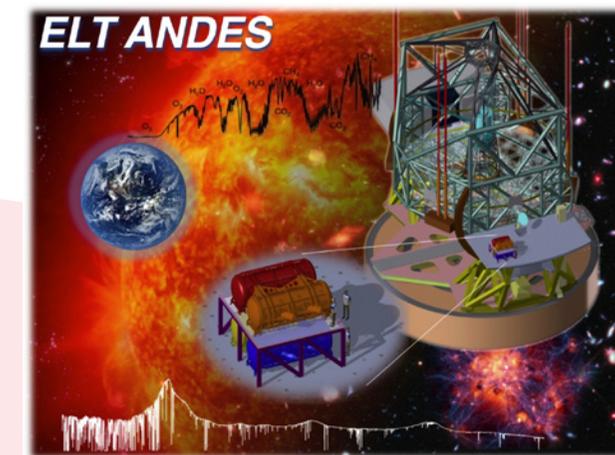
ANDES, anteriormente conocido como HIRES, es un instrumento para el próximo Extremely Large Telescope (ELT) del ESO. Se trata de un espectrógrafo de alta resolución extremadamente estable alimentado por haz de fibras, que cubre el rango continuo desde el visible (0,4 micras) hasta el infrarrojo cercano (1,8 micras). La combinación de una alta resolución y un amplio rango espectral con el área colectora del ELT producirá datos con muy poco ruido. Esto permitirá a ANDES estudiar objetos astronómicos muy débiles que requieran observaciones altamente sensibles.

Sus objetivos son: la detección de señales de vida en el estudio de las atmósferas de exoplanetas observadas en espectros de trasmisión o a partir de la luz que reflejan de sus estrellas; la variación de las constantes físicas fundamentales a lo largo de la evolución del Universo; y el test de Sandage, que consiste en medir de manera directa la expansión del Universo a partir de medidas de cambios en los desplazamientos al rojo de galaxias durante varias décadas.

El consorcio ANDES está liderado por el Instituto Nacional Italiano de Astrofísica (INAF) y está compuesto

Espectrógrafo ultraestable y de alta resolución espectral.  
Instrumento de segunda luz para ELT.  
IP en IAC: **Jonay González Hernández**

por más de 30 instituciones. El IAC, como miembro del consorcio ANDES, colaboró en la fase A con el diseño del haz de fibras y con el diseño opto-mecánico: banco óptico y monturas ópticas. También tiene responsabilidades en la segunda fase -Fase B del brazo azul (UBV) y el brazo rojo (RIZ)-, de nuevo en el diseño del banco óptico y monturas ópticas.



Impresiones artísticas del telescopio ELT y del instrumento ANDES. © ESO

# NISP

## (Near Infrared Spectrometer and Photometer)

Euclid es una misión espacial de la ESA, en el marco de Cosmic Vision 2015-2025, cuyo objetivo es realizar, con un telescopio reflector de 1,2 m, un mapa de la geometría de la materia oscura del Universo. La misión, lanzada el 1 de julio de 2023, investiga la relación entre la distancia y el desplazamiento al rojo y su relación con la evolución de las estructuras cósmicas. Para ello mide los perfiles de desplazamiento al rojo de las galaxias y cúmulos de galaxias hasta  $z \approx 2$ , lo que equivale a una mirada al pasado de unos 10.000 millones de años. Por tanto, cubre por completo el periodo en el cual la energía oscura jugó un papel significativo en la expansión del Universo.

El IAC ha colaborado con la Universidad Politécnica de Cartagena en el diseño, fabricación y puesta a punto de la Unidad de Control del Instrumento de NISP, un espectrógrafo y fotómetro de infrarrojo cercano que proporciona fotometría, espectros y desplazamientos al rojo de millones de galaxias. En particular, el IAC se ha encargado de realizar los módulos de monitorización y control térmico, la electrónica de la unidad de calibración en vuelo, así como los módulos de control de las ruedas de grismas y de filtros.

La participación científica se basa en la experiencia del equipo de investigación en áreas como las propiedades de la radiación cósmica de microondas, la caracterización de los procesos del medio interestelar, la detección y caracterización de cúmulos de galaxias y los procesos de formación estelar en galaxias con alto desplazamiento al rojo. En todos ellos, los *surveys* previstos con Euclid permitirán avances muy significativos y sinergias con otras bases de datos. El equipo también tiene experiencia en el desarrollo de herramientas para el análisis de grandes bases de datos y en el uso de grandes instalaciones astronómicas con diferentes técnicas de observación en una amplia parte del espectro electromagnético. La aplicación de las técnicas desarrolladas en trabajos previos a los datos de Euclid requiere en la mayoría de los casos la modificación de algoritmos existentes, su validación con datos simulados de Euclid y la preparación de programas de observación previos al lanzamiento de la misión. Como casos científicos destacan:

1. El uso del efecto de lente gravitacional para detectar galaxias con alto desplazamiento al rojo y, en particular, aquellas que están experimentando grandes brotes de formación estelar. Con respecto a los datos actuales disponibles, Euclid representa un avance muy significativo en cuanto a sensibilidad y cobertura del cielo,

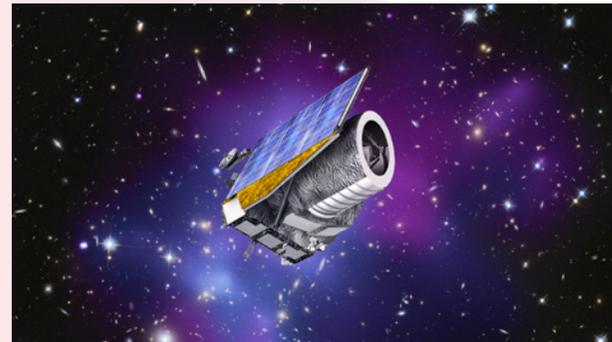
Espectrógrafo y fotómetro de infrarrojo cercano para la misión Euclid de la ESA.  
IP en IAC: **Rafael Rebolo López**

por lo que los nuevos datos aumentarán significativamente el número de objetos conocidos y será posible ampliar el trabajo a mayores desplazamientos al rojo.

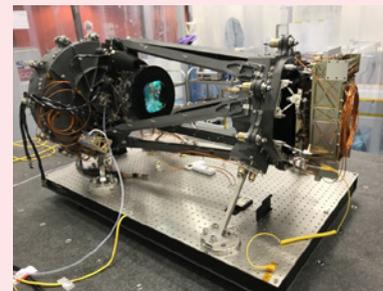
2. La inclusión de Euclid en las correlaciones entre grandes bases de datos permitirá importantes mejoras en la determinación de parámetros cosmológicos y en la caracterización de objetos astrofísicos a alto *redshift*.

3. La calibración de *redshifts* fotométricos: se trata de un programa que está reconocido por el Consorcio Euclid como un factor clave para lograr una correcta interpretación y explotación de los datos de la misión. La participación del IAC se focaliza en un programa de observación con GTC/OSIRIS ya en marcha y que representa aproximadamente un tercio del esfuerzo total y una contribución de primer orden al éxito de la misión.

La participación científica española está integrada por investigadores pertenecientes al IAC, UPCT, IFCA, CAB, IFT, Univ. de Salamanca y CEFGA.



Impresión artística de la misión Euclide.  
© ESA/C. Carreau.



Instrumento NISP.  
© Euclid Consortium y NISP Instrument Team

# Small-ELF

## (Small Exo-Life Finder)

La detección de vida extrasolar es uno de los descubrimientos científicos más importantes que podrían realizarse en un futuro relativamente cercano. El telescopio ExoLife Finder (ELF) será una nueva infraestructura científica capaz de detectar biomarcadores en exoplanetas y obtener detalles de sus superficies. Con al menos 35 m de diámetro, será un telescopio único y uno de los más ligeros del mundo, dedicado a la obtención de imágenes infrarrojas de alta resolución y contraste. Constará de un gran anillo de pequeños espejos primarios para lograr una alta resolución espacial angular con el principal objetivo científico de estudiar las atmósferas de exoplanetas. Este telescopio-interferómetro altamente flexible actuará como un coronógrafo que utiliza la estrella brillante central del sistema planetario candidato para aumentar las combinaciones independientes de los espejos primario y secundario en un foco gregoriano y revelar así el exoplaneta cercano.

Small-ELF es un proyecto que forma parte, junto con el Cherenkov Telescope Array (CTA), el European Solar Telescope (EST) y el New Robotic Telescope (NRT), del programa de "Grandes Telescopios" de IACTEC, el espacio de cooperación tecnológica y empresarial del IAC. Los equipos de ingeniería de dicho programa desarrollan su trabajo en el edificio IACTEC, gracias al convenio de colaboración para el desarrollo de la I+D+i que actualmente suscriben el Cabildo de Tenerife, la Universidad de La Laguna, el Parque Científico Tecnológico de Tenerife S.A. y el IAC. El proyecto también cuenta con fondos PRTR y de la Unión Europea (Laboratorio LIOM).

Antes de su construcción, el equipo tendrá que resolver grandes retos tecnológicos para conseguir un peso y un coste varias veces menor de lo habitual en este tipo de infraestructuras: el desarrollo de espejos ultraligeros y autocorregibles de densidad reducida; el uso de cables pre-tensionados, en lugar de un armazón rígido, para unir la estructura mecánica del telescopio; y el desarrollo de técnicas de *wavefront sensing* para medir las aberraciones de frente de onda y corregir la óptica del telescopio. Por ello, un prototipo denominado Small-ELF se instalará en el Observatorio del Teide con el fin de desarrollar las tecnologías necesarias para garantizar el éxito del proyecto ELF. Constará de una serie de 15 espejos de 0,5 m, dispuestos fuera del eje en un círculo de 3,5 m de diámetro, formando una parábola principal común, y de un pequeño espejo secundario elíptico.

El telescopio Small-ELF proporcionará una capacidad coronográfica única para la comunidad astronómica española. Aunque el principal objetivo científico será la obtención de imágenes de exoplanetas alrededor de estrellas cercanas, el Small-ELF podrá proporcionar observaciones de extraordinario contraste en el infrarrojo cercano con aplicaciones que van desde la detección de compañeras enanas

Prototipo de 3,5 m para el Observatorio del Teide del supertelescopio ELF, destinado a la detección de biomarcadores en exoplanetas.  
IP en IACTEC: **Nicolas Lodieu**

marrones alrededor de estrellas de tipo solar, hasta compañeras estelares alrededor de estrellas de gran masa y otros objetos como los AGN y los cuásares.

En España, no existen otras instalaciones capaces de proporcionar imágenes con un contraste de más de  $10^7$  a 6 veces la Función de Dispersión de Puntos (PSF) en el infrarrojo cercano. La mejora respecto a las instalaciones actuales es de al menos 3 órdenes de magnitud.

Está previsto que la construcción del Small-ELF comience en 2024. Inicialmente se utilizarán 15 espejos convencionales, pero se irán sustituyendo paulatinamente por espejos ultraligeros, utilizando una nueva tecnología basada en la curvatura pulida de espejos finos. Este nuevo concepto de telescopio permitirá abordar nuevos casos científicos y servirá de prototipo para futuros grandes telescopios.

El IAC forma parte de un consorcio formado además por el Instituto de Astronomía de la Universidad de Hawai (IfA) y el Centro de Investigación de Astrofísica de Lyon (CRAL) para desarrollar la interferometría de enmascaramiento de apertura (AMI) y profundizar en el conocimiento tecnológico ligado a esta técnica con potenciales aplicaciones en la detección y caracterización de planetas extrasolares a través del desarrollo de prototipos. Estas capacidades situarán al IAC/IACTEC en una posición ventajosa para la posterior construcción de telescopios de la clase de 40 m y mayores, integrados por innovadoras combinaciones de espejos finos y ligeros, únicos en el mundo.



Impresión artística del telescopio ELF. © Planets Foundation & ELF Consortium.

# NIRPS

(Near InfraRed Planet Searcher)

NIRPS es un espectrógrafo infrarrojo de nueva generación para estudios de exoplanetas alimentado por un haz de fibras e instalado en el telescopio de 3,6 m de ESO en el Observatorio de La Silla (Chile). Con una resolución espectral de al menos 80.000, dependiendo del modo de observación, espera medir velocidades radiales con una precisión de <1 m/s. NIRPS cubre simultáneamente las bandas Y, J y H (desde 973,79 nm a 1.808,53 nm), con una posible extensión de la banda K.

El principal caso científico de NIRPS es la búsqueda de planetas rocosos, en la zona de habitabilidad, objetivos clave para entender cómo se forman y evolucionan este tipo de objetos celestes, y en los que es más probable que se pueda desarrollar vida. NIRPS busca estos exoplanetas alrededor de estrellas enanas rojas pequeñas y frías, el tipo de estrellas más común en nuestra Vía Láctea, que tienen masas entre dos y diez veces más pequeñas que nuestro sol, y por el método de la velocidad radial, que mide el movimiento de una estrella debido a la influencia gravitacional de un planeta orbitándolo.

Cuando un planeta orbita alrededor de una estrella, su atracción gravitatoria hace que ésta se "tambalee" ligeramente. Al medir los sutiles cambios en la luz de la estrella, NIRPS ayudará a medir la masa del planeta, además de otras propiedades. También se puede utilizar como espectrógrafo de propósito general para observar objetos tan diversos como cometas o AGN brillantes.

NIRPS trabajará junto al instrumento HARPS, también cazador de exoplanetas, extendiendo su rango desde el visible al infrarrojo cercano, ideal para buscar exoplanetas similares a la Tierra alrededor de estrellas más rojas. Otra diferencia clave entre los dos instrumentos es que NIRPS se basará en un potente sistema de óptica adaptativa, una técnica que corrige los efectos de la turbulencia atmosférica, que hace que las estrellas titilen, mejorando así su eficacia para encontrar y estudiar exoplanetas.

Los descubrimientos realizados con NIRPS y HARPS serán seguidos por algunos de los observatorios más potentes del mundo, como el Very Large Telescope (VLT) de ESO y el próximo Extremely Large Telescope (ELT) de Chile (para el que se están desarrollando instrumentos similares). Al trabajar conjuntamente con observatorios espaciales y terrestres,

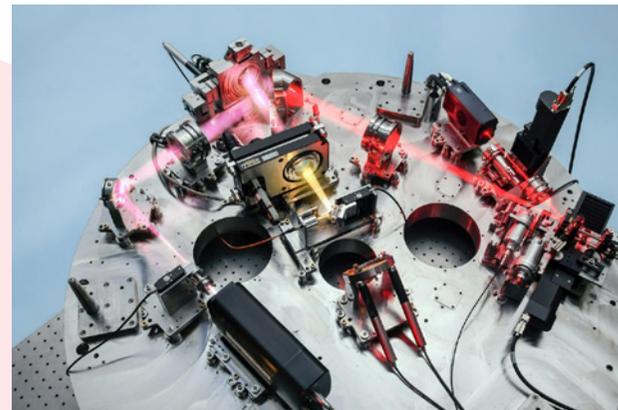
Espectrógrafo infrarrojo con Óptica Adaptiva y alimentado por fibras para el telescopio de 3,6 m del ESO en Chile.

IP en IAC: **Jonay González Hernández**

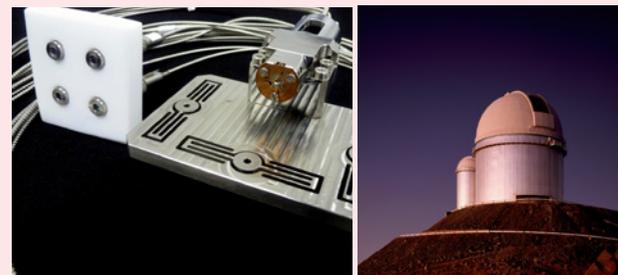
NIRPS podrá obtener pistas sobre la composición de un exoplaneta e, incluso, buscar signos de vida en su atmósfera.

El IAC ha participado diseñando y suministrado el haz de fibras (*Fiber Link*) que conecta el foco del telescopio con el espectrógrafo, llevando la luz de la unidad *Front End* hasta el punto exacto en el banco óptico dentro de la cámara de vacío (a temperatura criogénica).

Consortio: Univ. de Montreal (Canadá), Univ. de Ginebra (Suiza), Inst. de Ciencias de Astrofísica e Ciências do Espaço y la Univ. de Oporto (Portugal), Univ. de Grenoble (Francia), Univ. Federal do Rio Grande do Norte en Natal (Brasil) y el IAC.



NIRPS y su sistema de óptica adaptativa, instalado en el telescopio de 3,6 m de ESO. © N. Blind (Observatoire de Genève)/Consortio NIRPS/ESO



A la izquierda, haz de fibras de NIRPS. A la derecha, el telescopio de 3,6 m de ESO en Chile, donde se ha instalado el instrumento NIRPS. © ESO

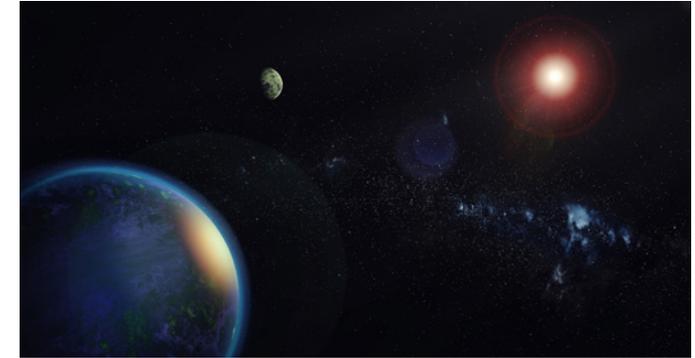
# Pequeños planetas alrededor de estrellas pequeñas

## Buscando exoplanetas por medio de luz infrarroja

Las enanas rojas son las estrellas más comunes del Universo. Estas estrellas, más pequeñas y frías que el Sol, son propensas a albergar sistemas multiplanetarios, en ocasiones, con uno o varios planetas en sus zonas de habitabilidad (región a una determinada distancia de la estrella cuya temperatura permite a planetas rocosos contener agua líquida en su superficie y, por tanto, la posibilidad de albergar vida). Por su baja masa, además, estas zonas se hallan cerca de la estrella, haciendo más sencillo encontrar planetas similares a la Tierra a su alrededor. Estas características han hecho que, en los últimos años, todas las miradas se vuelvan hacia estas pequeñas estrellas. El resultado ha sido el descubrimiento de una decena de exoplanetas potencialmente habitables en el vecindario solar. En contra de lo que se pensó durante muchos años, las enanas rojas se han convertido en la "estrella" de la búsqueda de exoplanetas. Descubrimientos como el planeta terrestre en la zona de habitabilidad de Próxima Centauri, el sistema Trappist-1 o el reciente descubrimiento de un sistema de dos tierras potencialmente habitables orbitando a la estrella GJ 1002, las sitúa en un lugar central dentro de la astrofísica actual.

No todo son ventajas. Las enanas rojas tienen sus propias particularidades y su estudio implica dificultades específicas. Estas estrellas tan frías son muy rojas. Tan rojas que apenas brillan en luz visible, la luz que usan la mayoría de los espectrógrafos dedicados a la búsqueda de exoplanetas. También tienden a ser bastante activas. En ocasiones, su rotación genera señales periódicas que pueden confundirse fácilmente con planetas. En la práctica, hasta ahora sólo hemos podido estudiar adecuadamente un pequeño grupo de enanas rojas. Las más brillantes y las más tranquilas. Para poder estudiar la mayoría de estas estrellas en profundidad, necesitamos observarlas con luz infrarroja, que atenúa estos dos problemas. Las enanas rojas son brillantes en luz infrarroja y las señales causadas por actividad estelar son mucho más pequeñas.

El espectrógrafo NIRPS (*Near-InfraRed Planet Searcher*), el nuevo instrumento infrarrojo instalado en el telescopio de 3,6 m del Observatorio de La Silla, en Chile, y diseñado para



Recreación artística de dos planetas de masa terrestre alrededor de la estrella GJ 1002. © Alejandro Suárez Mascareño (IAC)

la búsqueda de exoplanetas alrededor de enanas rojas, aprovecha que estas estrellas son mucho más brillantes en el infrarrojo para poder observarlas. NIRPS utiliza una red *échelle* para dividir la luz en sus diferentes longitudes de onda y una cámara para detectar la luz en el infrarrojo cercano. Además, incluye un potente sistema de óptica adaptativa. Esta técnica corrige los efectos de la turbulencia atmosférica, causa de que las estrellas titilen, mejorando así su capacidad de recolectar luz de las estrellas.

Este espectrógrafo de alta resolución busca exoplanetas mediante el método de la velocidad radial y es capaz de medir velocidades con precisión de 1 m/s, suficiente para detectar la presencia de planetas similares a la Tierra en la zona de habitabilidad de enanas rojas.

NIRPS estudiará la población de enanas rojas del vecindario solar, buscando todos aquellos planetas similares a la Tierra que hasta ahora han pasado desapercibidos. Con este instrumento, se espera descubrir decenas de planetas en los que, en el futuro, se podrán buscar señales de vida, utilizando telescopios gigantes de próxima generación, como el ELT, o futuras misiones espaciales. Las peculiaridades de NIRPS le permitirán también estudiar la población de estrellas ultrafrías, aquellas que se encuentran en el límite de dejar de ser estrellas, o medir las masas de planetas jóvenes, aprovechando una vez más el brillo de estas estrellas en el infrarrojo o la menor contribución de actividad estelar.

Con NIRPS se abre un nuevo capítulo en la búsqueda de exoplanetas. Por primera vez habrá un espectrógrafo infrarrojo capaz de detectar la presencia de planetas similares a la Tierra incluso en las estrellas más débiles. Hoy conocemos hasta una decena de planetas similares al nuestro en las inmediaciones. En los próximos años, el vecindario solar podría volverse muy concurrido.

ALEJANDRO SUÁREZ MASCAREÑO  
astrofísico del IAC

# Telescopios espaciales IR

## IRAS

El Satélite Astronómico Infrarrojo (IRAS, *InfraRed Astronomical Satellite*) fue el primer telescopio espacial en realizar un estudio de todo el cielo en longitudes de onda infrarrojas. Lanzado el 25 de enero de 1983, su misión duró diez meses, hasta que el suministro de helio líquido para refrigerar su instrumentación se agotó. El telescopio, de una tonelada de peso y con un espejo de apenas 60 cm de diámetro, fue un proyecto conjunto de Estados Unidos, Países Bajos y Reino Unido. Mapeó el 96% del cielo cuatro veces, encontrando unas 500.000 fuentes de infrarrojo, algunas de las cuales siguen aún pendientes de identificación. Se cree que unas 75.000 de estas fuentes son galaxias en formación, mientras que muchas otras pueden ser estrellas con un disco de polvo a su alrededor. IRAS obtuvo las primeras imágenes del núcleo de la Vía Láctea y descubrió un disco de polvo alrededor de Vega, así como cuatro asteroides.

Impresión artística de IRAS. © IPAC/Caltech

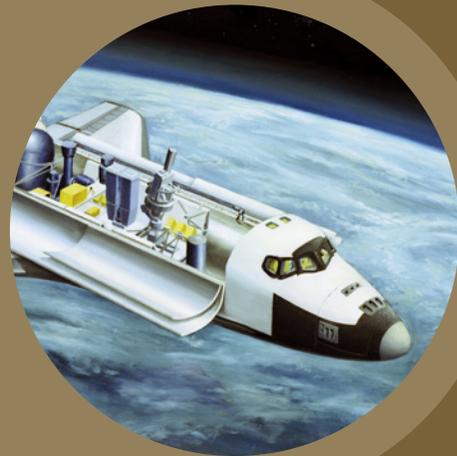


## IRT de Spacelab 2

Spacelab 2 (STS-51-F) fue el vuelo 19 del programa *Space Shuttle* de la NASA y el octavo del *Challenger*. Se lanzó desde el Centro Espacial Kennedy el 29 de julio de 1985 y aterrizó ocho días después. Durante la misión, un telescopio infrarrojo (IRT), de 15,2 cm de diámetro, recopiló información del 60% de la radiación infrarroja del cielo, entre las longitudes de onda de 1,7 a 118 micras. Se analizaron tanto radiaciones emitidas desde nuestra galaxia como fuera de ella. El IRT fue el primer telescopio criogénicamente refrigerado utilizado en la lanzadera y sirvió como demostración de la capacidad de controlar grandes volúmenes de helio líquido en el espacio.

La NASA también ha utilizado aviones modificados para transportar pequeños telescopios infrarrojos, como KAO (*Kuiper Airborne Observatory*), que en 1977 observó los anillos planetarios de Urano, y en 1988, la atmósfera de Plutón. También, SOFIA (*Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy*), con la agencia espacial alemana DLR, que detectó la molécula de hidruro de helio en la nebulosa planetaria NGC 7027 y confirmó la presencia de agua en la superficie de la Luna iluminada por el Sol. Algunas misiones de la NASA se han combinado con otras longitudes de onda, como SWAS (*Submillimeter Wave Astronomy Satellite*), o con objetivos principalmente militares, como el satélite MSX (*Midcourse Space Experiment*).

Impresión artística de Spacelab 2. © NASA



## ISO

El Observatorio Espacial Infrarrojo (ISO, *Infrared Space Observatory*) fue diseñado y operado por la Agencia Espacial Europea (ESA), en cooperación con las agencias espaciales de Japón y Estados Unidos. Lanzado el 17 de noviembre de 1995, estuvo operativo hasta abril de 1998, cuando se terminó su refrigerante de helio líquido superfluido. Considerado un sucesor de IRAS con un telescopio de un tamaño similar (con un espejo de 0,6 m), su instrumentación de a bordo tenía mucha mayor sensibilidad y resolución. Uno de sus 4 instrumentos, ISOPHOT, tuvo una relevante participación española con el espectrofotómetro ISOPHOT-S, liderado por el IAC. ISO funcionó como un verdadero observatorio, de manera similar a los telescopios terrestres, en los cuales los astrónomos proponían distintas observaciones para estudiar en detalle objetos o fenómenos específicos. ISO realizó de media 45 observaciones cada 24 horas, y un total de 26.000 observaciones científicas exitosas a lo largo de sus 900 órbitas. A partir de estos análisis, se ha descubierto la presencia de vapor de agua en algunas regiones de formación estelar en las proximidades de estrellas al final de su vida, en fuentes muy cercanas a centros galácticos, en las atmósferas de algunos planetas del Sistema Solar y en la Nebulosa de Orión. También detectó la formación de planetas alrededor de estrellas moribundas, la presencia de gas fluoruro de hidrógeno en nubes de gas interestelar, las primeras fases de la formación estelar, polvo cósmico entre galaxias, el objeto más luminoso en su momento (ARP 220), hidrocarburos fríos que irradian principalmente en el infrarrojo, discos protoplanetarios y la composición de los planetas del Sistema Solar. Centenares de astrónomos de distintos países aún continúan analizando los datos recopilados por ISO.

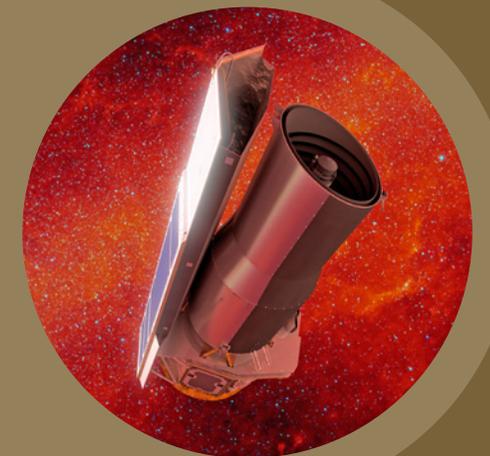
Impresión artística de ISO. © ESA/ISO



## Spitzer

Este telescopio espacial, uno de los grandes observatorios espaciales de la NASA y nombrado en honor del físico Lyman Spitzer Jr., se puso en órbita el 25 de agosto de 2003. Con una abertura de 85 cm, mayor que IRAS e ISO, sus operaciones científicas se prolongaron nada menos que dieciséis años, hasta enero de 2020. La larga duración de su misión lo ha convertido en uno de los más productivos en astronomía infrarroja hasta la fecha. Su objetivo era el estudio de objetos fríos que van desde el Sistema Solar exterior hasta los confines del Universo. Entre sus logros destaca la detección de un diminuto planeta extrasolar HD14026b, el más caliente en su momento (2007), con 3.700°C, además de una inmensa cantidad de vapor de agua dentro de un sistema solar en formación llamado NGC 133-IRAS 4B.

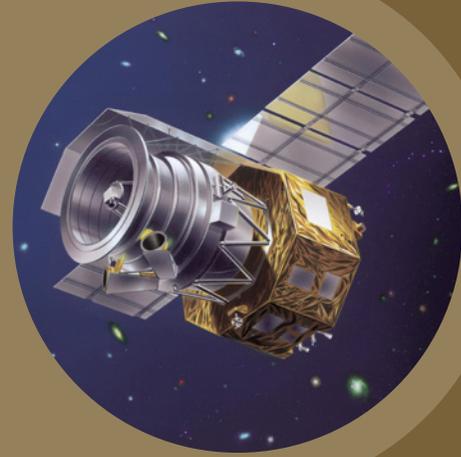
Impresión artística del Spitzer, sobre un fondo de imagen IR. © NASA/JPL-Caltech/R. Hurt, IPAC



## Akari

Akari (palabra que significa luz en japonés), también llamado ASTRO-F, fue un satélite de astronomía infrarroja desarrollado por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón, JAXA, en cooperación con institutos de Europa y Corea. Con un telescopio dotado de un espejo de 68 cm de diámetro, fue lanzado el 21 de febrero de 2006 y dejó de funcionar por un fallo eléctrico en noviembre de 2011. Algunos hitos de este satélite fueron el estudio de los procesos de formación de sistemas planetarios y de nuevos cometas, la detección infrarroja de un remanente de supernova en la Pequeña Nube de Magallanes, la localización de una región de formación de estrellas en la constelación del Cisne y el descubrimiento de pérdida de masa en gigantes rojas relativamente jóvenes del cúmulo globular NGC 104.

Impresión artística de Akari. © ISAS/JAXA



## WISE

Con un espejo de solo 40 cm de diámetro, el pequeño telescopio infrarrojo WISE de la NASA (*Wide-field Infrared Survey Explorer*) se lanzó el 14 de diciembre de 2009. Desde entonces, ha descubierto millones de agujeros negros, miles de planetoides y numerosos cúmulos estelares, así como la galaxia más luminosa en su momento (2015), WISE J224607.57-052635.0. Su misión primaria hasta que su refrigerante se agotó duró unos diez meses, pero tras un periodo de hibernación, en diciembre de 2013 fue activado de nuevo con la denominación de NEOWISE para la búsqueda de asteroides cercanos a la Tierra, tarea en la que sigue activo hoy en día.

Impresión artística de WISE en órbita terrestre. © NASA/JPL-Caltech



## Herschel

El observatorio espacial Herschel, de la ESA, ha sido el telescopio infrarrojo más grande jamás lanzado hasta la entrada en funcionamiento del telescopio espacial James Webb en 2022. Con un espejo primario de 3,5 m e instrumentos sensibles al infrarrojo lejano y las bandas submilimétricas, despegó el 14 de mayo de 2009, junto con el observatorio Planck, y estuvo observando hasta abril de 2013, con el ya consabido agotamiento de su refrigerante. Al igual que el James Webb, su lugar de observación fue el punto de Lagrange L2, a 1,5 millones de km de la Tierra en dirección opuesta al Sol. Especializado en la observación de objetos distantes poco conocidos, sus objetivos eran estudiar la formación de galaxias en el Universo primitivo y su evolución, examinar la química molecular del Universo, investigar la creación de estrellas y observar la composición química de la atmósfera y la superficie de cometas, planetas y satélites. El IAC ha participado en la instrumentación de este telescopio.

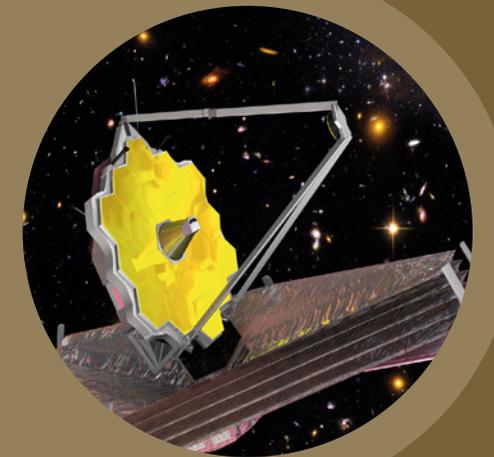
Impresión artística del Herschel. © ESA – D. Ducros, 2009



## James Webb

Actualmente es el mayor y más avanzado telescopio espacial del mundo, una colaboración entre las agencias espaciales de Estados Unidos, Europa y Canadá. Bautizado con el nombre del director en los años sesenta de la NASA, despegó el 25 de diciembre de 2021 y, tras un complejo despliegue de su óptica (18 segmentos hexagonales que conforman un espejo primario de 6,5 m de abertura optimizado para la observación en el infrarrojo), empezó sus investigaciones en el punto L2 el verano de 2022, con una operación prevista de unos quince años de duración. En algunos de sus instrumentos hay una potente participación científica e industrial española, también del IAC.

Impresión artística del James Webb. © NASA



## Hubble (NICMOS y WFC3)

El telescopio espacial Hubble (HST), lanzado en 1990 y aún operativo, que honra la memoria del astrónomo Edwin Hubble, también se ha equipado con instrumentos infrarrojos, aun siendo un telescopio reflector que trabaja sobre todo en longitudes de ondas ópticas y ultravioletas. El primer instrumento IR, instalado en 1997, fue NICMOS (*Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer*), una cámara y espectrómetro para longitudes de onda entre 800 y 2.500 nanómetros. Con él se observó un gigantesco cúmulo de estrellas en el centro de nuestra Vía Láctea. Fue reemplazado por WFC3 (*Wide Field Camera*), en funcionamiento desde que se instaló en 2009 durante la misión del servicio 4 del HST. El instrumento tiene dos canales, uno para luz ultravioleta y visible (UVIS) y otro para infrarrojo cercano (NIR). Con esta cámara de gran angular se obtuvo una espectacular imagen de la nebulosa Cabeza de Caballo.

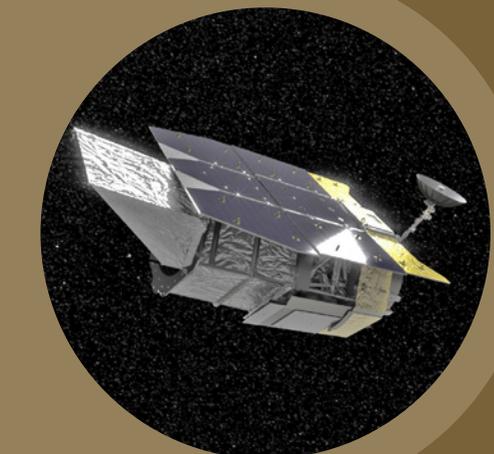
El telescopio espacial Hubble en órbita. © NASA



## Nancy Grace Roman

El telescopio espacial Nancy Grace Roman, nombrado en honor de la conocida astrónoma de la NASA, es un nuevo instrumento infrarrojo de esta agencia espacial estadounidense en colaboración con agencias espaciales europeas y de Japón, actualmente en construcción y cuyo lanzamiento está programado para mayo de 2027. Tendrá un espejo primario de 2,4 m de diámetro y observará desde L2, como Herschel y el James Webb, con una vida de misión prevista de unos cinco años.

Diseño preliminar del telescopio espacial Nancy Grace Roman. © NASA



# EL ISOPHOT-S

## Un viajero al universo invisible

El 17 de noviembre de 1995, la Agencia Europea del Espacio (ESA) lanzó desde la Guayana francesa un satélite pensado para proporcionar a los astrónomos la posibilidad de una exploración sin precedentes del Universo. Lo haría en el infrarrojo, una banda del espectro aún no bien conocida debido a las limitaciones impuestas por la atmósfera terrestre, que actúa como filtro. El *Infrared Space Observatory* (ISO), que mejoraba notablemente a su antecesor IRAS, constaba de un telescopio de 60 cm enfriado criogénicamente y estaba equipado con cuatro instrumentos para obtener imágenes y realizar observaciones fotométricas (ISOCAM), espectroscópicas (SWS y LWS) y polarimétricas (ISOPHOT). El IAC participaba en este último con un espectrofotómetro concebido originalmente por el investigador del IAC Carlos Sánchez Magro -el ISOPHOT-S- y que mereció la máxima calificación por parte de la ESA. Tras el fallecimiento de este astrofísico, el IAC declinó liderar la parte española de este proyecto europeo, si bien terminó asumiendo ese papel con éxito. Esta fue la primera vez que España participaba en el diseño y construcción de instrumentación científica de un proyecto espacial.



Una visión artística del PHT-S. Con dos láseres de diferentes colores se ha simulado el recorrido de los dos haces de luz, a partir del dicróico, que se ve en el centro de la fotografía. El haz rojo, que simula el brazo de longitud de onda larga, se refleja desde el exterior en el dicróico, y tras difractarse en la red, se refleja ya descompuesto espectralmente, en la cámara que lo envía a su detector. El haz verde, que representa al brazo de longitud de onda corta, recorre todo el camino del haz, entrando por la apertura (arriba a la izquierda), siguiendo por el primer espejo, colimador, cara opuesta del dicróico, red de difracción, cara opuesta de la cámara y detector. En este último vemos un reflejo verde, arriba a la derecha.



© ISO/ESA

En 1984, un Consorcio Internacional formado por instituciones de Alemania, Reino Unido, Dinamarca y España, presentaron a la ESA el ISOPHOT, una propuesta de instrumentación para el observatorio infrarrojo ISO.

Finalmente, fue uno de los instrumentos de alta tecnología que equiparon el satélite. Los otros tres fueron: ISOCAM, una cámara en infrarrojo operativa de 2,5 a 18 micras; ISOSWS (*Short-Wave Spectrometer*), capaz de observar de 2,4 a 45 micras y analizar la composición química de objetos muy fríos; y ISOLWS (*Long-Wave Spectrometer*), operativo

entre las 45 y 197 micras, enfocado al estudio espectroscópico de objetos muy fríos, como nubes de polvo en el espacio interestelar.

ISOPHOT, por su parte, era un fotopolarímetro operativo entre 2,5 y 240 micras, con resoluciones espaciales desde 1,5 segundos de arco (en las longitudes de onda más cortas) hasta 90 segundos de arco (en las longitudes de onda más largas) y capaz de observar objetos a muy pocos grados por encima del cero absoluto. Su función consistía en medir la intensidad de la radiación y su grado de polarización, informando tanto de la fuente misma como del medio interestelar que la radiación atravesaría en su viaje hasta nosotros.

### ESPECTROFOTÓMETRO INFRARROJO

Uno de los tres instrumentos que, a su vez, formaron parte del ISOPHOT fue propuesto por **Carlos Sánchez Magro**, investigador del IAC. La ESA lo valoró especialmente por no presentar ninguna parte móvil y por permitir la detección rápida de los objetos que se iban a medir. El llamado ISOPHOT-S (también PHT-S) fue un espectrógrafo infrarrojo equipado con dos avanzados conjuntos de detectores y que filtraba la radiación recogida por el telescopio, separando la luz infrarroja en la ventana entre 2 y 12 micras en dos bandas: de 2 a 5 micras y de 6 a 12 micras, que se enviaban para su análisis a cada uno de los dos brazos del espectrómetro. Todos los componentes eran fijos, lo que proporcionaba una gran solidez y fiabilidad para ser dirigido desde tierra. Su sistema de detección constaba de dos mosaicos lineales de detectores de SiGa (silicio dopado con galio) de 64 elementos cada uno. El desarrollo de estos detectores estuvo basado en las más modernas técnicas de construcción y diseño, alcanzándose como resultado una sensibilidad muy superior a la que se obtenía con detectores al uso. Con ISOPHOT-S se obtendría el espectro infrarrojo o huella dactilar de las estrellas y demás objetos cósmicos que se observaran.

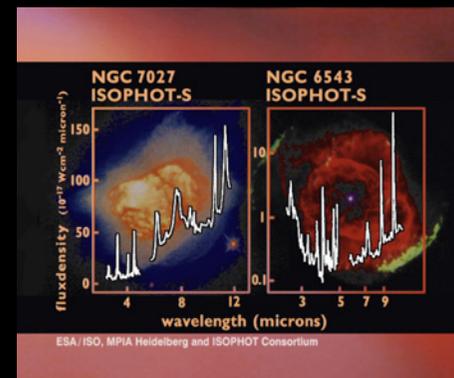
Tras la muerte en 1985 del prof. Carlos Sánchez, el IAC entendió que debía abandonar el liderazgo de la parte española. La responsabilidad del diseño del prototipo pasó al ICST (Imperial College of Science and Technology), mientras que el desarrollo, fabricación, cualificación y suministro al Contratista Principal del ISOPHOT de los subsecuentes modelos quedó bajo responsabilidad española, asumida por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA) y liderada por el Dr. **Víctor Costa**.

Al comienzo de la fase de fabricación y ensayos (fase C-D, según la denominación de ESA), el IAC retomaría la responsabilidad de la participación española, deshaciéndose el consorcio español inicial. Al frente estaría el astrofísico del IAC **Francisco Garzón**, mientras que la empresa española CASA (Construcciones Aeronáuticas, S.A.) diseñaría y fabricaría la estructura mecánica y la empresa alemana BATTELLE desarrollaría y construiría los detectores.

Durante esta fase, el IAC adecuó el nivel de participación al de los demás consorciados, cumpliendo en tiempo y forma los compromisos adquiridos, a saber, la entrega de los modelos de alineamiento, cualificación, vuelo y repuesto del instrumento, y la participación activa en la definición del programa central de observación presentado por el consorcio ISOPHOT y aprobado por el grupo global ISO. Consciente de la necesidad de asegurar su explotación científica, se organizó un grupo de trabajo con astrofísicos españoles con alguna experiencia en astronomía infrarroja y con interés en la utilización del satélite. Este grupo se encargaría de preparar todo lo necesario para un mejor aprovechamiento del satélite por parte de la comunidad astrofísica española.

### MODELOS DEL INSTRUMENTO

Siguiendo un riguroso programa de verificación, el IAC desarrolló diferentes modelos del instrumento: el modelo de Alineamiento, donde se probó el ajuste mecánico y óptico dentro del experimento ISOPHOT; el modelo de Cualificación, una copia real del modelo que sirvió para integrar y cualificar el sistema óptico, así como para probar el funcionamiento global tanto del hardware como del software y su resistencia a diferentes ensayos de vibración y enfriado; el modelo de Vuelo, el que realmente voló en el satélite y que, obviamente, cumplía todas las especificaciones, habiendo superado todas las pruebas previstas y el estricto control de calidad que la ESA imponía entonces a cualquiera de sus proyectos; y el modelo de Repuesto, una copia exacta del modelo de Vuelo, al que debería reemplazar en caso de fallo. Debía estar, por tanto, construido, ensayado y calibrado. Parte de los ensayos se realizaron en el Telescopio Carlos Sánchez (TCS), en el Observatorio del Teide.



Espectros de NGC 7027 y NGC 6543 obtenidos con ISOPHOT-S.



La galaxia Andrómeda en infrarrojo. ©ESA/ISO/ISOPHOT y M. Haas et al.

En el Laboratorio de Fotografía del IAC se desarrolló una técnica para imprimir fotográficamente retículos de 40 micras de ancho de línea sobre cristales, que fue utilizada posteriormente en la fabricación de los componentes ópticos del modelo de alineamiento.

### CALIBRACIÓN ÓPTICA

Esta fue la primera vez que se llevó a cabo en España la calibración óptica de un instrumento espacial en el rango entre 2 y 12 micras, simulando las condiciones operativas durante el lanzamiento y la fase de vuelo. Como todo instrumento que iba a ser incluido en una misión espacial, los diferentes prototipos del ISOPHOT-S tuvieron que someterse durante su construcción a diferentes pruebas de verificación. Una vez en órbita, no existiría la posibilidad de reparación o sustitución, por lo que estas verificaciones eran absolutamente imprescindibles y se llevaron a cabo simulaciones estrictas de las peores condiciones que se podían dar en el espacio. Una de las pruebas más espectaculares fue el ensayo de vibración, destinado a comprobar la resistencia mecánica del instrumento cuando fuera sometido a bruscas y violentas vibraciones como las que se producen en el momento del lanzamiento. El ensayo de vibración se realizó en dos partes: en la primera, el experimento se sometió a vibraciones a temperatura ambiente; y en la segunda, tras superar la primera, el ensayo se hizo a una temperatura de trabajo de -270°C, con el experimento encerrado en su criostato de pruebas y enfriado con helio líquido. Tras finalizar la prueba, se revisó minuciosamente el modelo para buscar posibles fracturas o deformaciones en el material, y se midió después la posición de todos los componentes y tornillos de ajuste para comprobar si se hubiera producido algún desplazamiento durante el ensayo. Finalmente se verificó el correcto funcionamiento óptico y electrónico del instrumento.

El ISO, junto con el Observatorio Solar SOHO, fueron los primeros satélites en los que España participaba con instrumentación científica. El IAC lideró esta participación con la financiación del Programa Nacional del Espacio de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT).

Grupo científico-técnico del IAC que participó:  
Investigador Principal: Francisco Garzón; Alineamiento y calibración ópticos: Santiago Arribas, Evencio Mediavilla, Roberto López y José Miguel Rodríguez Espinosa; Diseño electrónico: Juan Carlos González y Luis Fernando Rodríguez; Diseño mecánico: Vicente Sánchez y Juan Calvo; en Equipo de calibración de ISOPHOT durante el vuelo y explotación científica: Héctor Castañeda y José A. Acosta Pulido; Secretaría del Proyecto: Adela Rivas y Natividad García.

Además del IAC, formaron parte del consorcio ISOPHOT las siguientes instituciones: Instituto de Estudios Avanzados de Dublín, Irlanda (DIAS); Instituto Danés de Investigación Espacial, Dinamarca (DSRI); Imperial College de Londres, Reino Unido; Instituto Max-Planck de Astronomía de Heidelberg, Alemania (MPIA); Instituto Max-Planck de Física Teórica de Heidelberg, Alemania (MPIK); Instituto Max-Planck de Radioastronomía de Bonn, Alemania (MPIR); Observatorio de Copenhague, Dinamarca; Rutherford Appleton Laboratory, Reino Unido (RAL); Universidad Libre de Berlín, Alemania. El IAC encabezó a su vez un consorcio compuesto por: Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), Instituto de Óptica Daza de Valdés y CASA (Construcciones aeronáuticas, S.A.). El seguimiento del satélite ISO se realizó desde la estación de Villafranca del Castillo, en Madrid.

# El IAC y el Observatorio infrarrojo HERSCHEL

Dos telescopios espaciales, Herschel y Planck, de la ESA, fueron lanzados conjuntamente el 14 de mayo de 2009, el Año Internacional de la Astronomía, en un cohete Ariane 5 ECA, desde Kourou, en la Guayana Francesa. Su puesta en marcha supuso un gran paso adelante para el conocimiento sobre la historia y la composición del Universo.



Herschel sobre un fondo con la imagen de Vela C, una región de formación estelar. © ESA/PACS & SPIRE Consortia, T. Hill, F. Motte, Laboratoire AIM Paris-Saclay, CEA/IRFU – CNRS/INSU – Uni. Paris Diderot, HOBYS Key Programme Consortium

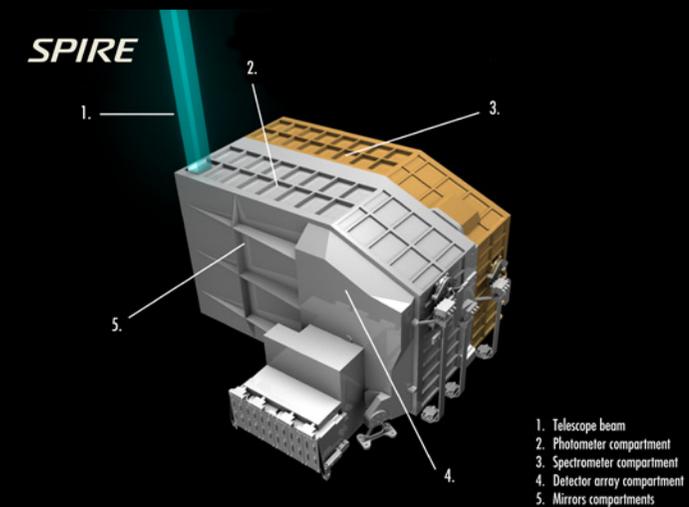
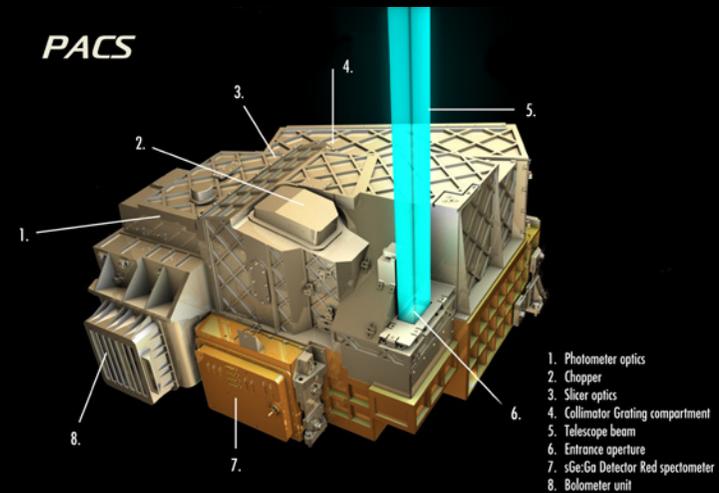
con tres instrumentos en su interior que sacaron el máximo rendimiento a las características de la misión. Para medir en el rango infrarrojo, los instrumentos debían estar cerca del cero absoluto por lo que fueron equipados con sistemas de refrigeración adicionales.

A los pocos minutos de su lanzamiento, Planck y Herschel, se separaron. Tras dos meses, Herschel llegó a su órbita, donde permaneció hasta el 29 de abril de 2013, al quedarse sin el líquido refrigerante necesario para mantenerse frío. Durante la misión, Herschel realizó más de 35.000 observaciones científicas y acumuló más de 25.000 horas de datos científicos de aproximadamente 600 programas de observación diferentes.

Varios centros de investigación españoles participaron en el desarrollo de ambas misiones. Entre ellos, el IAC contribuyó científica y tecnológicamente en tres de los

Tras su lanzamiento, retransmitido en directo en el Museo de la Ciencia y el Cosmos, del Cabildo de Tenerife, Planck y Herschel tardaron dos meses en situarse en órbita a 1,5 millones de kilómetros de distancia de la Tierra, cuatro veces la distancia entre nuestro planeta y la Luna. Allí, orbitaron alrededor del segundo punto de Lagrange, un lugar seguro que permite que estos satélites se mantengan en órbitas muy estables.

El espejo primario del telescopio Herschel, de 3,5 m de diámetro, fue uno de los principales retos tecnológicos de la misión ya que fue el más grande diseñado hasta esa fecha para viajar al espacio. Se trataba de un nuevo y avanzado concepto formado por 12 pétalos de carburo de silicio soldados en una sola pieza. Herschel viajaba



Impresiones artísticas de los distintos componentes de PACS y SPIRE. © ESA

**PACS** (*Photodetector Array Camera and Spectrometer*)

IP en IAC: **Jordi Cepa**

**SPIRE** (*Spectral and Photometric Imaging Receiver*)

IP en IAC: **Ismael Pérez Fournon**

Cámaras y espectrómetros infrarrojos para el observatorio espacial Herschel y capaces de captar imágenes en seis "colores" distintos del infrarrojo lejano.



El tumultuoso corazón de la Gran Nube de Magallanes. Los datos que componen esta imagen provienen de SPIRE y PACS, del Herschel, y del fotómetro de imágenes multibanda (MIPS) de Spitzer. © ESA/NASA/JPL-CALTECH/STSCI

cinco instrumentos a bordo de estos satélites y en el desarrollo de subsistemas avanzados en dos de ellos.

Para el observatorio Herschel, el IAC desarrolló la unidad de procesado de señal de PACS, una cámara y un espectrómetro de resolución baja-media para longitudes de onda de hasta unos 205 micrómetros que utiliza dos conjuntos de bolómetros en la cámara y dos de detectores fotoconductores en el espectrómetro. PACS fue diseñado y construido por un consorcio -autofinanciado- de científicos e instituciones de Alemania, Bélgica, Austria, Francia, Italia y España.

El IAC también participó activamente en el diseño y preparación de SPIRE, una cámara y un espectrómetro de resolución baja-media para longitudes de onda superiores a 200 micras que utiliza cinco conjuntos de detectores: tres para captar imágenes de fuentes de infrarrojo en tres "colores" de infrarrojo distintos y dos para el análisis completo de la luz infrarroja de mayor longitud emitida por la fuente. SPIRE fue diseñado y construido por un consorcio -autofinanciado- de científicos e instituciones de Reino Unido, Francia, Canadá, China, Italia, España, Suecia y EEUU.

# El misterio de las galaxias rojas “muertas”

En 2013, un equipo internacional en el que participaron investigadores del IAC y de la Universidad de La Laguna (ULL), observaron la formación de una galaxia muy lejana (ULL), observaron la formación de una galaxia muy lejana (ULL), observaron la formación de una galaxia muy lejana (ULL), a partir de la fusión violenta de otras dos. Los datos, obtenidos por telescopios espaciales de la NASA y la ESA junto con telescopios terrestres, contradecían así la teoría más común que explica la formación de las galaxias muy masivas a partir de la incorporación de otras más pequeñas a lo largo del tiempo. Diez años más tarde, gracias al telescopio espacial James Webb, podemos estudiar otras galaxias muy jóvenes, en el comienzo del Universo. Un equipo internacional, en el que han participado los investigadores del IAC **Frédéric Poidevin** e **Ismael Pérez Fournon**, ha descubierto la galaxia ultracompacta RX J2129-z95 a un desplazamiento al rojo de 9,51 con los instrumentos NIRCам y NIRSpec del JWST. Esta galaxia es muy distinta de las galaxias infrarrojas descubiertas con Herschel, pero presenta también una formación estelar muy alta para su tamaño tan pequeño, de solo 16 pc. Los resultados se han publicado en la revista *Science*.

Cuando el Universo tenía tres o cuatro mil millones de años estaba ya poblado por galaxias elípticas masivas y rojizas formadas por viejas estrellas. La comunidad científica le ha dado muchas vueltas a la cuestión de si estas galaxias se formaron lentamente a lo largo del tiempo mediante la incorporación de galaxias más pequeñas (el modelo más popular y aceptado) o si lo hicieron rápidamente a partir de poderosas colisiones entre dos galaxias grandes. Un estudio, que apareció publicado en la revista *Nature*, señalaba que es este último modelo de grandes colisiones violentas y fusiones masivas el generador de las galaxias rojas "muertas". No parece que en la juventud del Universo reinara la calma.

El observatorio espacial Herschel tomó imágenes a través de grandes nubes de polvo de una fusión muy poco frecuente de dos galaxias masivas. Los estudios sucesivos realizados gracias a varios telescopios espaciales y terrestres, entre ellos el telescopio espacial Hubble y el telescopio William Herschel (WHT) con el instrumento infrarrojo LIRIS, en el Observatorio del Roque de los Muchachos, cuentan la historia de dos lejanas galaxias entrelazadas que fabrican estrellas frenéticamente. Finalmente, se espera que la pareja se asiente y se convierta en una sola galaxia elíptica supergigante. “Estas galaxias

fusionadas están explotando, formando nuevas estrellas y se encuentran completamente cubiertas por polvo”, señala **Ismael Pérez Fournon**, investigador del IAC, profesor de la ULL y coautor del trabajo. “Sin los detectores sensibles al infrarrojo lejano del instrumento SPIRE de Herschel, no habríamos sido capaces de ver a través del polvo la acción que tenía lugar detrás”.

## EL EFECTO "LENTE" DE LAS GALAXIAS

En el nuevo estudio, Herschel fue usado para identificar las galaxias que chocaban entre sí, llamadas HXMM01, localizadas a unos 11 mil millones de años luz, en un tiempo en el que nuestro universo tenía unos tres mil millones de años. Al principio, los astrónomos pensaron que los dos objetos eran, de hecho, varias imágenes amplificadas, como en un espejo, de una sola galaxia. El efecto "lente" producido por otras galaxias en el camino de la luz emitida por las galaxias rojas lejanas es bastante común en astronomía y se produce cuando la gravedad de una galaxia en primer plano "dobla" la luz procedente de un objeto más distante. Después de una meticulosa investigación, no obstante, el equipo se dio cuenta de que en realidad estaban mirando a dos galaxias masivas fusionándose.

Las caracterizaciones de la pareja en colisión revelaron que estaban generando el equivalente a 2.000 soles al año. Por comparación, la Vía Láctea "incuba" entre dos y tres soles al año. El número total de estrellas de los dos cuerpos observados es de unos 400 mil millones de soles.

Las fusiones son bastante comunes en el Cosmos, pero este evento en particular es más inusual, dada las prolíficas cantidades de gas y estrellas en formación, y la gran intensidad de la fusión en una época tan distante.

“Las observaciones realizadas con el instrumento LIRIS del telescopio William Herschel ayudaron a determinar -destaca la investigadora del IAC y coautora del estudio **Paloma Martínez Navajas**- la gran masa estelar de las dos galaxias lejanas. Los telescopios de tamaño mediano con instrumentación infrarroja siguen siendo fundamentales en estos estudios”.

El IAC, como miembro del consorcio internacional que construyó el instrumento SPIRE, ha podido participar en HerMES, el mayor proyecto con Herschel, un estudio de diferentes aspectos de la evolución de las galaxias en

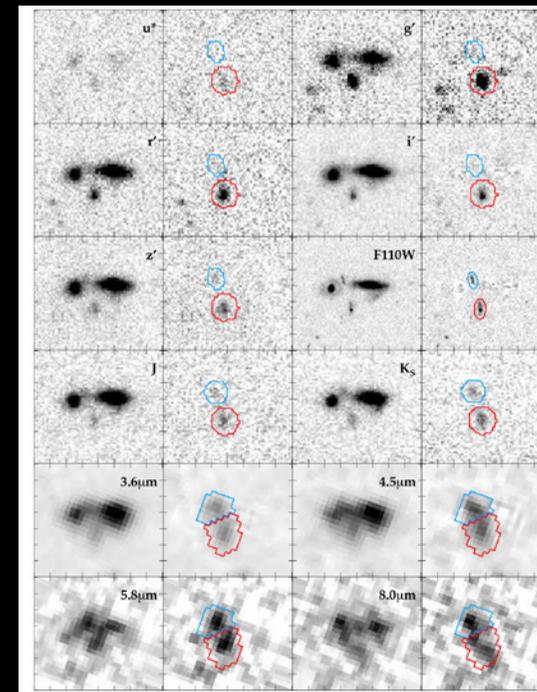
el Universo distante basado principalmente en observaciones con esta cámara infrarroja.

Para el futuro no muy lejano, hay cuatro proyectos compitiendo para ser la NASA Probe Mission que funcionará en el rango infrarrojo o en rayos X. El IAC y otros centros españoles participan en uno de ellos: la misión PRIMA (*The Probe far-Infrared Mission for Astrophysics*).

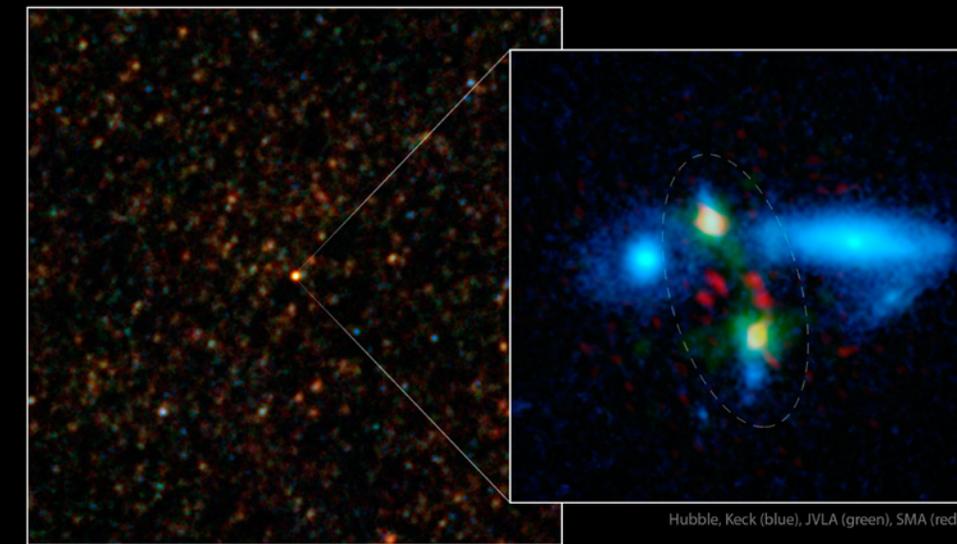
## REFERENCIAS:

- Hai Fu et al. (2013). “The rapid assembly of an elliptical galaxy of 400 billion solar masses at a redshift of 2.3”. *Nature*, 498, 338–341.
- Williams, H. et al. (2023). “A magnified compact galaxy at redshift 9.51 with strong nebular emission lines”, *Science*, 380, 6643, 416-420.

Varios telescopios han contribuido al descubrimiento de la formación de una galaxia masiva muy lejana, HXMM01, a partir de la fusión de dos galaxias masivas muy luminosas en el infrarrojo lejano cuando el Universo tenía unos tres mil millones de años. A la izquierda, imagen del Herschel. © ESA/NASA/JPL-Caltech/UC Irvine/STScI/Keck/NRAO/SAO



Imágenes de HXMM01 y sus dos componentes principales, X01N y X01S, obtenidas con los telescopios CFHT, HST, WHT y Spitzer. Las imágenes del WHT, obtenidas en las bandas J y Ks mediante el instrumento LIRIS, formaron parte de un Programa Internacional de Tiempo (IP: I. Pérez-Fournon, IAC). Todas las imágenes son de 16"×14" y están alineadas, con N arriba y E a la izquierda. Las marcas están a intervalos de 2". Para cada filtro, la imagen original se muestra a la izquierda y la imagen residual después de restar las dos galaxias en primer plano se muestra a la derecha. Las aperturas utilizadas para la fotometría se describen en las imágenes residuales (azul - X01N; rojo - X01S)



Herschel Space Observatory

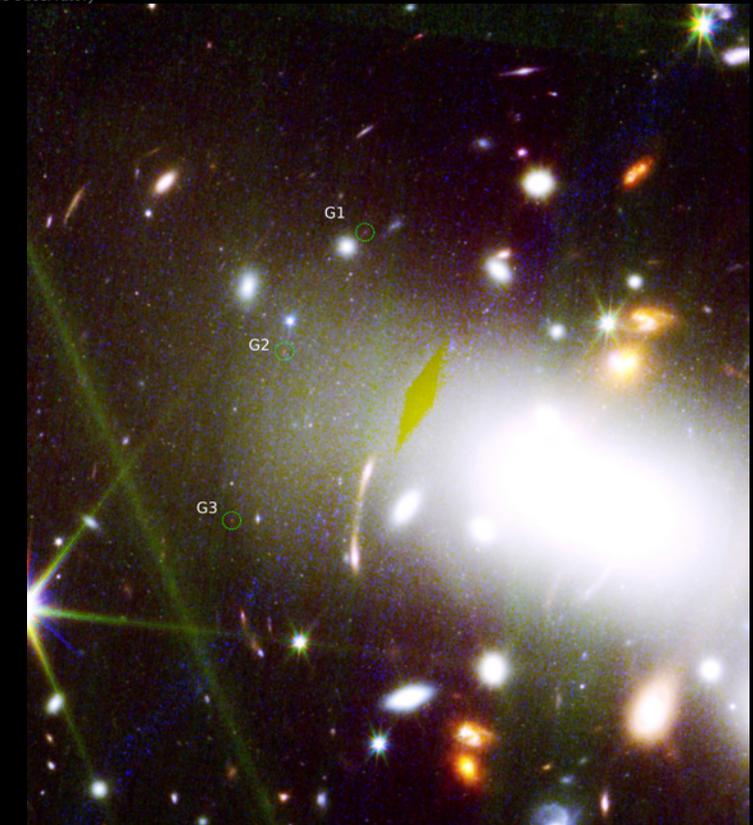
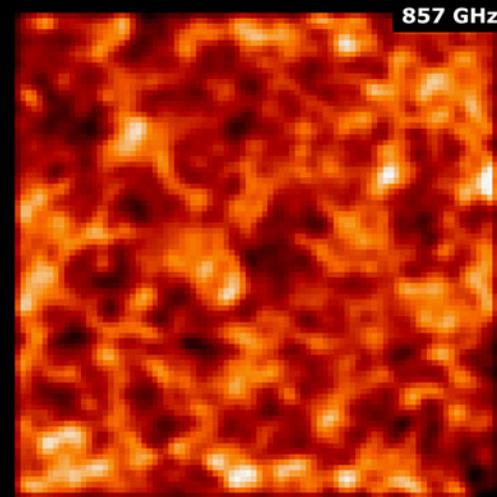


Imagen en color del cúmulo de galaxias RX J2129 obtenida con los instrumentos NIRCам de JWST y ACS de HST en la que se muestran las tres imágenes (G1, G2 y G3) de la misma galaxia RX J2129-z95, a un desplazamiento al rojo de 9,51, medido a partir de un espectro de G2 obtenido con el instrumento NIRSpec de JWST. © Williams et al. 2023

# La contribución de PLANCK al infrarrojo

Planck, lanzado conjuntamente con el telescopio Herschel, fue el primer observatorio espacial europeo cuyo objetivo principal se centraba en el estudio del Fondo Cósmico de Microondas, la radiación fósil del Big Bang que impregna todo el Universo. Sin embargo, uno de los resultados más interesantes de este satélite fue detectar el Fondo Cósmico Infrarrojo y sus variaciones espaciales en el rango submilimétrico e infrarrojo lejano.



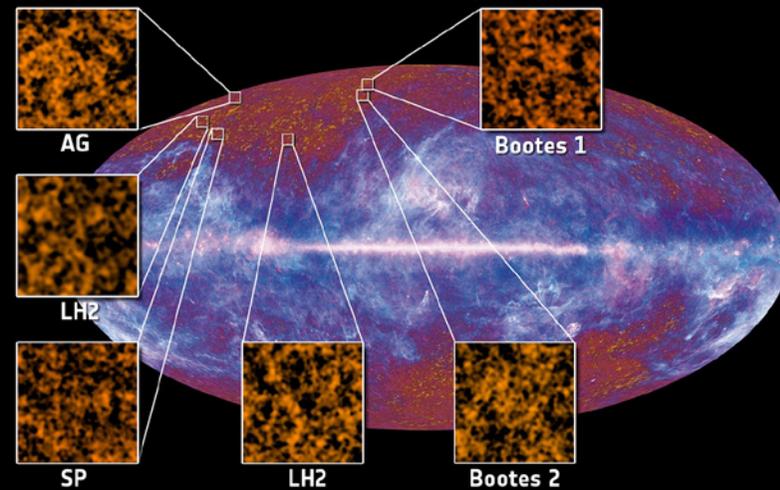
Fluctuaciones en el CIB observadas por Planck en varias frecuencias. © ESA/Planck Collaboration

Planck disponía de dos instrumentos: LFI (*Low Frequency Instrument*) y HFI (*High Frequency Instrument*), que cubrían 9 bandas de frecuencia, desde 30 GHz a 857 GHz. El IAC participó tanto en la construcción del primero de ellos (baja frecuencia, 30, 44 y 70 GHz), desarrollando la electrónica de adquisición y el software de procesado de datos, como en la explotación científica de la misión completa.

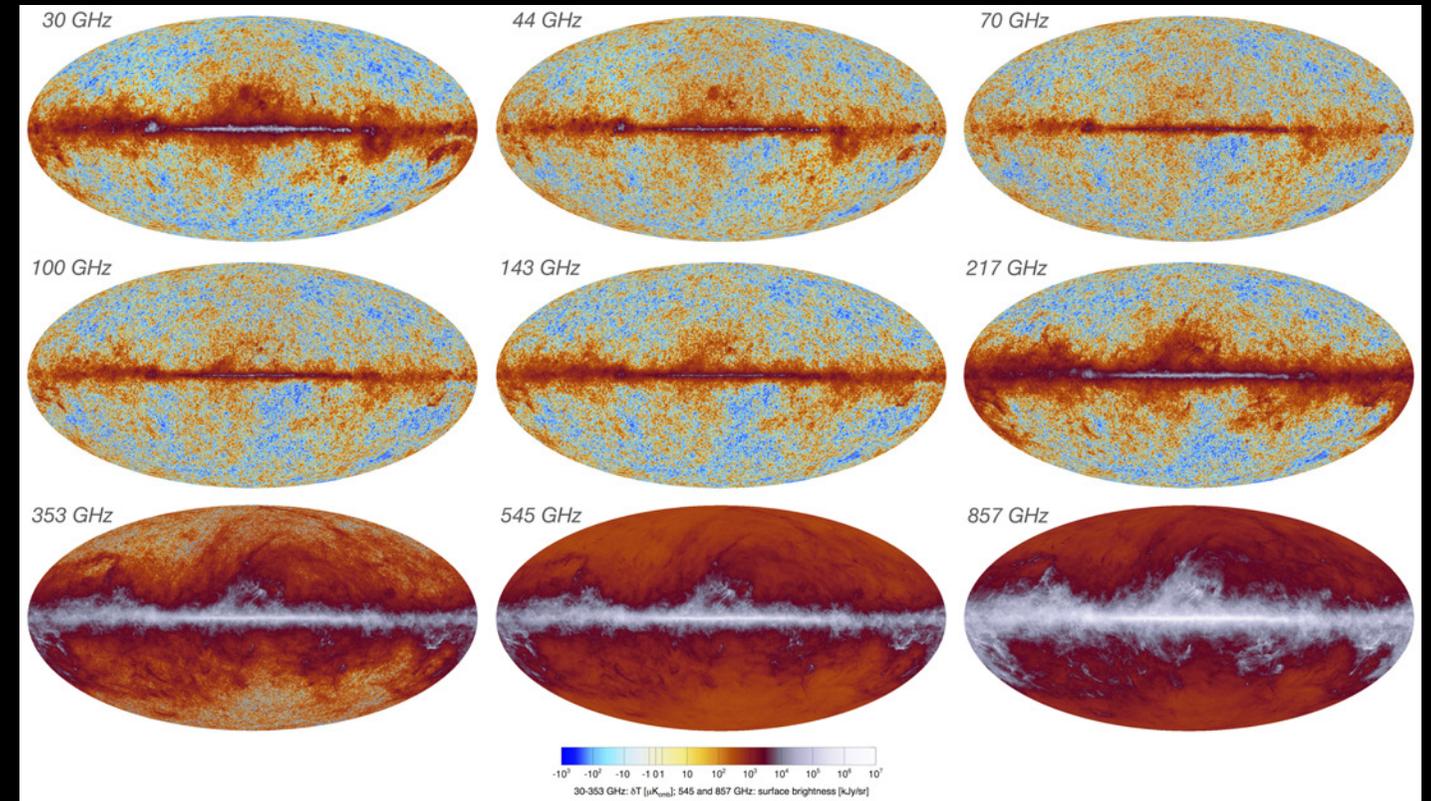
Aunque la mayor parte de los canales del satélite operaban en el rango desde el centimétrico al milimétrico, los tres canales de más alta frecuencia (353, 545 y 857GHz) exploraban la región del infrarrojo lejano (850, 550 y 350 micras, respectivamente).

## EL FONDO CÓSMICO INFRARROJO

Mientras cartografiaba el Fondo Cósmico de Microondas (CMB, de sus siglas en inglés) señalando sus pequeñas anisotropías o fluctuaciones con una precisión sin precedentes, Planck también capturaba otra emisión de fondo muy intrigante que alcanza su punto máximo en un rango de longitud de onda diferente, el Fondo



Ubicación en el cielo de los primeros seis campos utilizados para detectar las anisotropías del CIB. © ESA/Planck Collaboration



Mapas en Intensidad de Planck, desde 30 hasta 857 GHz [Julio 2018]. © ESA/Planck Collaboration

Cósmico Infrarrojo (CIB). Esta radiación difusa, unas 50 veces más débil que el CMB, consiste en la luz emitida por el polvo de todas las galaxias del Universo desde su formación. Una emisión infrarroja acumulada a lo largo de la historia cósmica que transporta una gran cantidad de información sobre los procesos de formación de estrellas en esas galaxias.

Las galaxias polvorientas que forman estrellas con un alto desplazamiento al rojo son extremadamente difíciles de detectar individualmente porque son tan débiles y numerosas que la confusión entre las fuentes afecta sustancialmente a las observaciones. Además, la resolución angular que se puede

lograr en las regiones submilimétricas y del infrarrojo lejano del espectro electromagnético (las longitudes de onda bastante largas en las que tales objetos emiten la mayor parte de su radiación) no es particularmente buena. En este contexto, el CIB representa una herramienta excepcional para estudiar estos objetos estadísticamente y rastrear su distribución global.

La señal detectada por Planck exhibe un alto grado de estructura y permite a los astrónomos investigar el vínculo aún poco claro entre las galaxias con formación estelar y la distribución subyacente de la materia oscura, hasta las primeras fases de formación de la estructura cósmica en el universo primitivo. Las fluctuaciones detectadas en el CIB trazan la distribución a gran escala de las galaxias formadoras de estrellas y, hasta cierto punto, la distribución de los halos de materia oscura en los que se cree que residen las galaxias.

## LFI (*Low Frequency Instrument*)

Red de 11 receptores radiométricos en las bandas Ka, Q y V, con frecuencias centrales cercanas a los 30, 44 y 70 GHz.

IP en IAC: **Rafael Rebolo López**

Coordinador del grupo científico de cúmulos de galaxias: **José Alberto Rubiño Martín**

# Moléculas precursoras de la vida en la Nube de Perseo

Un estudio liderado por el IAC y con datos del satélite infrarrojo Spitzer ha puesto de manifiesto la abundante presencia de moléculas orgánicas complejas en una de las regiones de formación estelar más próximas al Sistema Solar. Los resultados de este trabajo se han publicado en 2023 en la revista Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Al cierre de la edición de esta revista, también se había encontrado en un sistema estelar de la Nube de Perseo evidencia de la existencia de triptófano, un aminoácido indispensable para la formación de proteínas y para el desarrollo de organismos vivos.

El equipo científico formado por las investigadoras **Susana Iglesias-Groth**, del IAC y primera autora del trabajo, y **Martina Marin-Dobrincic**, de la Universidad Politécnica de Cartagena, ha descubierto la presencia de numerosas moléculas prebióticas en la región de formación estelar IC 348 de la Nube Molecular de Perseo, un joven cúmulo de estrellas de 2-3 millones de años de edad.

Algunas de estas biomoléculas están consideradas ladrillos esenciales para la construcción de moléculas más complejas, como los aminoácidos, que dieron forma al código genético de antiguos microorganismos e hicieron que la vida prosperara en la Tierra. Conocer la distribución y abundancias de estas moléculas precursoras en regiones donde muy probablemente se están formando planetas, es uno de los mayores retos de la astrofísica.

La Nube de Perseo es una de las regiones de formación estelar más cercanas al Sistema Solar. Muchas de sus estrellas son jóvenes y contienen discos protoplanetarios en los que acontecen los procesos físicos que dan lugar a los planetas. “Es un extraordinario laboratorio de química orgánica”, explica Iglesias-Groth. En 2019, esta astrofísica halló en la misma nube molecular fullerenos, moléculas puras de carbono que, con frecuencia, aparecen como bloques de construcción de moléculas claves para la vida.

Ahora, una nueva investigación ha conseguido detectar, en la parte interna de esta región del cielo, moléculas

comunes como hidrógeno molecular ( $H_2$ ), hidroxilo (OH), agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y amoníaco ( $NH_3$ ), así como varias moléculas carbonáceas que pueden jugar un papel importante en la producción de hidrocarburos más complejos y moléculas prebióticas, tales como cianuro de hidrógeno (HCN), acetileno ( $C_2H_2$ ), diacetileno ( $C_4H_2$ ), cianoacetileno ( $HC_3N$ ), cianobutadieno ( $HC_5N$ ), etano ( $C_2H_6$ ), hexatrina ( $C_6H_2$ ) y benceno ( $C_6H_6$ ).

Los datos también muestran la presencia de moléculas más complejas como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH, por sus siglas en inglés) y los fullerenos C60 y C70. “IC 348 parece ser muy rico y diverso en contenido molecular –señala Iglesias-Groth–. La novedad está en que vemos las moléculas en el gas difuso a partir del cual se están formando estrellas y discos protoplanetarios”.

La presencia de moléculas prebióticas en ubicaciones interestelares tan próximas al núcleo de este cúmulo estelar sugiere la posibilidad de que estén teniendo lugar procesos de acreción en planetas jóvenes que podrían contribuir a la formación de moléculas orgánicas complejas. “Estas moléculas clave podrían haber sido aportadas a los planetas nacientes en los discos protoplanetarios y podrían así facilitar en ellos el camino hacia las moléculas de la vida”, subraya Marin-Dobrincic.

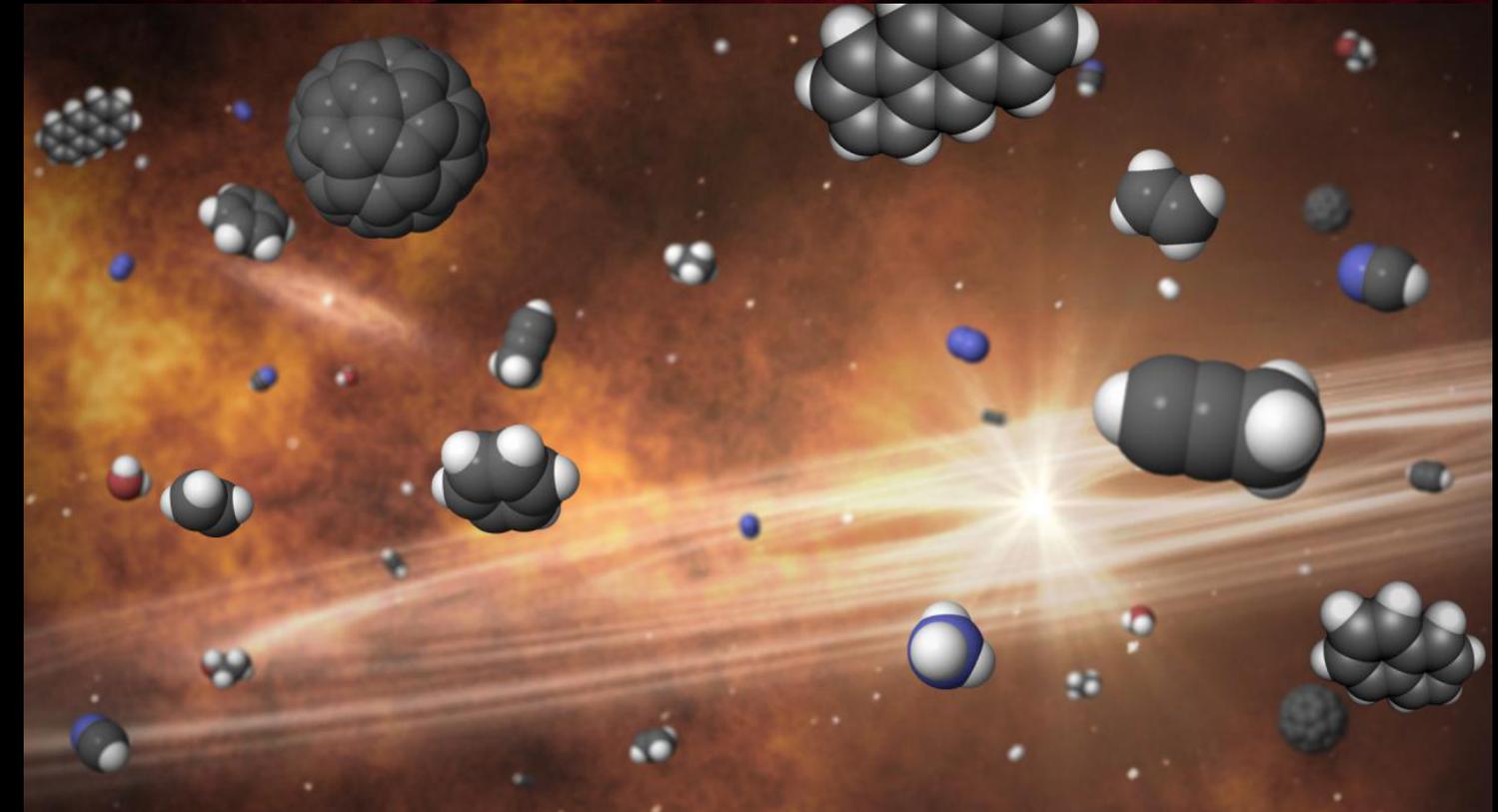
La detección realizada por las dos investigadoras se basa en datos tomados con el satélite Spitzer de la NASA. El siguiente paso será utilizar el potente telescopio espacial James Webb (JWST). “Las capacidades espectroscópicas del JWST podrán proporcionar detalles sobre la distribución espacial de todas estas moléculas y extender la presente búsqueda a otras más complejas, proporcionando una mayor sensibilidad y resolución, esenciales para confirmar la muy probable presencia de aminoácidos en el gas de esta y otras regiones de formación estelar”, concluye Iglesias-Groth.

#### REFERENCIAS:

-Iglesias-Groth, S. y Marin-Dobrincic, M. (2023). “A rich molecular chemistry in the gas of the IC 348 star cluster of the Perseus Molecular Cloud”. MNRAS, 521, 2, 2248–2269.  
-Iglesias-Groth, S. (2023). “A search for tryptophan in the gas of the IC 348 star cluster of the Perseus Molecular Cloud”. MNRAS, 523, 2, 2876–2886.



Nube molecular de Perseo, imagen obtenida con el satélite infrarrojo Spitzer. © NASA/JPL-Caltech



Composición artística de una "sopa" de moléculas prebióticas alrededor de un disco protoplanetario. © Gabriel Pérez Díaz, SMM (IAC)

# El telescopio espacial JAMES WEBB

Sin duda, el Hubble ha supuesto para la astronomía una auténtica revolución, gracias en especial a su capacidad de ser reparado y mejorado por astronautas, y que ha permitido que su vida útil se haya prolongado todos estos años. Sin embargo, tras la última de estas misiones de mantenimiento en mayo de 2009, ya hacía tiempo que se venía trabajando a fondo en el que podríamos llamar su «sustituto»: el telescopio espacial James Webb. No obstante, mientras que el Hubble observa fundamentalmente en el visible, el James Webb, por el contrario, lo hace exclusivamente en el infrarrojo.

Más de treinta años de operación ininterrumpida para una máquina de cierta complejidad suele ser un periodo bastante largo y, a pesar de reparaciones y mejoras que se le puedan realizar, después de tres décadas ya no contará ni con la tecnología ni con las prestaciones más avanzadas que una máquina más moderna sí tiene. Da lo mismo que hablemos de una lavadora, de un coche o, en este caso, de un telescopio.

En abril de 2022, el más famoso del mundo, el Telescopio Espacial Hubble, cumplía nada menos que 32 años en órbita. Veamos unas cuantas cifras a modo de resumen de su carrera: en todo ese tiempo desde su lanzamiento el 24 de abril de 1990, y moviéndose a 28.000 km/h a casi 600 km de altura sobre la Tierra, el Hubble ha realizado bastante más de un millón largo de observaciones de decenas de miles de objetos celestes distintos. Los más de 10.000 astrónomos que han utilizado el Hubble han publicado más de 15.000 artículos de investigación, lo que le convierte en uno de los instrumentos científicos más productivos nunca construidos.

¿Cómo es el nuevo telescopio espacial James Webb? Si el parámetro que suele determinar la diferencia fundamental en cualquier telescopio es el diámetro de su espejo primario, y, por ende, su capacidad colectora de luz, comparemos los del Hubble y el James Webb. Mientras que el veterano Hubble tiene un único espejo monolítico de 2,4 m, el James Webb tiene 18 segmentos de forma hexagonal que conforman un primario equivalente de 6,5 m de abertura; es decir, su superficie colectora es 6,5 veces mayor que la del Hubble.

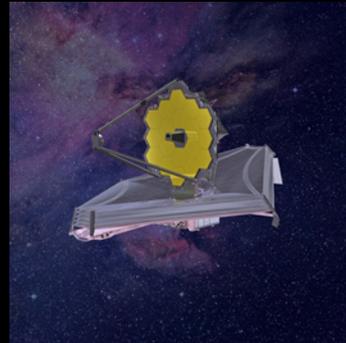
En el origen del proyecto del que se llamó en un principio el Telescopio Espacial de Nueva Generación (NGST, de sus siglas en inglés), hará ya un cuarto de siglo nada menos, se pretendía que el diámetro del espejo fuese de 10 m, pero complicaciones tecnológicas y, especialmente, económicas, hicieron que se rebajase el tamaño del telescopio hasta los 6,5 m actuales.

A fecha de hoy, su coste ha superado los 10.000 millones de dólares (más o menos lo que cuesta un portaviones nuclear, por comparar). Proyecto conjunto de la NASA y las agencias espaciales europea y canadiense, el telescopio fue renombrado como James Webb (también JWST, de James Webb Space Telescope) en septiembre de 2002 en honor a uno de los administradores de la NASA en los años dorados del proyecto Apollo.

Muchos y novedosos son los desarrollos tecnológicos que se han hecho para el James Webb. Por subrayar solo algunos de ellos, mencionemos su espejo primario segmentado, que se lanza plegado en tres partes que se montan en el espacio tras su despegue; óptica fabricada en berilio, un material ultra ligero y resistente; o enfriadores criogénicos que permiten bajar la temperatura de los detectores del telescopio hasta solo 7 Kelvin y optimizar así su observación en el infrarrojo, la zona del espectro donde observa el James Webb.

Tras casi una década de construcción, en los elementos del telescopio destacan los segmentos hexagonales del espejo primario recubiertos de una capa micrométrica de oro —especialmente reflectante en el infrarrojo— y los cuatro instrumentos científicos que lleva a bordo. Estos son una cámara en el infrarrojo cercano (NIRCam), un espectrógrafo multiobjeto también en el infrarrojo cercano (NIRSpec), otro instrumento para el infrarrojo medio (MIRI) y una cámara con filtros sintonizables (FGS/NIRISS). El rango espectral de trabajo del James Webb está entre los 0,6 y los 27 nanómetros, con cierta capacidad para observar también en el visible.

Se han definido cuatro áreas científicas principales para el telescopio, y que han recibido estos inspiradores títulos: El Final de las Eras Oscuras: Primera Luz y la Reionización; El Ensamblaje de las Galaxias; El Nacimiento de las Estrellas y los Sistemas



Impresión artística del telescopio espacial James Webb. © Northrop Grumman



El James Webb, poco antes de entrar en la cámara de vacío donde se le sometió a temperaturas criogénicas para comprobar su funcionamiento en las condiciones extremas del espacio. Los segmentos del espejo primario están recubiertos con una película reflectante de oro para optimizar la observación en el infrarrojo. © NASA/Chris Gunn.

Protoplanetarios; y Sistemas Planetarios y los Orígenes de la Vida. Así, estudiará todas las etapas de la historia del Universo, desde los primeros destellos luminosos tras el Big Bang, hasta la formación de sistemas planetarios capaces de albergar vida en mundos como la Tierra, pasando por la evolución de nuestro propio sistema solar.

Otra de las innovaciones de este telescopio espacial respecto del Hubble es que, a diferencia de este, no orbita próximo a la Tierra, a apenas unos centenares de kilómetros de la superficie, sino que en su lugar se ubica nada menos que 2.500 veces más lejos: a 1,5 millones de km de nuestro planeta en dirección contraria al Sol, en un punto donde las atracciones gravitatorias del Sol, la Tierra y la Luna se equilibran —conocido como Lagrange 2 o L2— y las condiciones de observación son mucho mejores que en una órbita baja como la del Hubble. Eso sí, no serán posibles las visitas de mantenimiento de los astronautas, por lo que es mucho más robusto y fiable que el Hubble. Su enorme tamaño (6.500 kg de peso) hace también que el cohete capaz de ponerlo en órbita haya sido la versión más potente del Ariane 5 ECA europeo. Tras numerosos retrasos debidos, por un lado, a la enorme complejidad del telescopio, y por otro, a las restricciones presupuestarias de la agencia espacial estadounidense, el día de Navidad de 2021, el Ariane 5 con el James Webb a bordo despegó desde el puerto espacial de Kourou en la Guayana francesa.

Tras un vuelo hacia L2 que le llevó un mes, durante el que el telescopio se desplegó en el espacio como un gigantesco origami, y como una especie de mariposa tecnológica, cientos de mecanismos, engranajes, servomotores, poleas y tensores funcionaron todos secuencialmente a la perfección abriendo hacia el frío vacío del espacio el ojo del telescopio. En un proceso posterior de varias semanas se ajustó y calibró la óptica y sus instrumentos, y a finales de la pasada primavera éstos alcanzaron su temperatura de trabajo, a más de 260 grados bajo cero, listos para comenzar las operaciones científicas. Las primeras y espectaculares imágenes obtenidas por el James Webb se hicieron públicas el 12 de julio de 2022, en medio de una enorme expectación por parte de los medios de comunicación de todo el mundo.

La vida de trabajo prevista para el James Webb es de un mínimo de cinco años, llevando combustible suficiente para sus maniobras en L2 para más de diez. Si todo va bien, durará hasta 2035, complementándose perfectamente con los telescopios gigantes de 30 y 40 m en tierra que se están construyendo en la actualidad y que empezarán a estar operativos a finales de esta década. ¿Qué maravillas nos descubrirá este «sucesor» del Hubble? Como siempre suele pasar en ciencia, sus mayores descubrimientos no los podemos ni sospechar.

ÁNGEL GÓMEZ ROLDÁN,  
director de la revista *Astronomía*



Los Pilares de la Creación, una región de formación estelar, en una espectacular imagen obtenida por el James Webb el pasado mes de octubre. © NASA, ESA, CSA, STScI. Procesado de la imagen: Joseph De Pasquale, Anton M. Koekemoer y Alyssa Pagan (STScI)

# Contribuciones científicas del IAC con el James Webb

## Analizando la atmósfera de un exoplaneta

El telescopio espacial James Webb ha conseguido realizar un retrato molecular y químico de los componentes atmosféricos del exoplaneta WASP-39 b, bautizado como Bocaprins, un gigante del tamaño de Saturno que orbita alrededor de una estrella de tipo solar llamada Malmok, situada a unos 700 años luz en la constelación de Virgo. Las observaciones proporcionan un menú completo de átomos y moléculas –agua, dióxido de azufre, monóxido de carbono, sodio y potasio–, así como signos de química activa y nubes. El conjunto de descubrimientos se detalla en una serie de cinco artículos científicos elaborados por una colaboración internacional en la que participan investigadores del IAC.

Al analizar con tanta precisión la atmósfera de un exoplaneta, los instrumentos del telescopio James Webb superaron con creces las expectativas de los científicos y prometen una nueva fase de exploración entre la amplia variedad de exoplanetas de nuestra galaxia. “Estos resultados son una confirmación de la capacidad de los instrumentos del James Webb para explorar las atmósferas de todo tipo de exoplanetas, incluidos los mundos pequeños y rocosos”, subraya **Enric Pallé**, investigador del IAC que ha participado en el estudio.

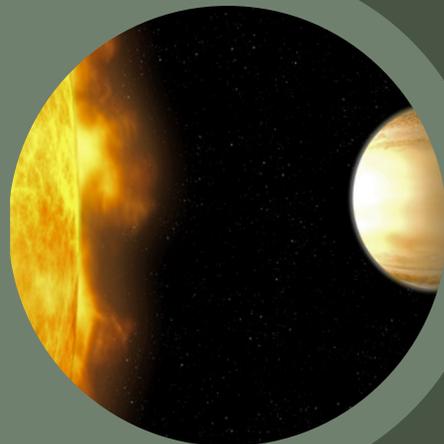
REFERENCIAS:  
-Alderson, L. et al. (2023). “Early Release Science of the Exoplanet WASP-39b with JWST NIRSpec G395H”. Nature, 614, 664-669.  
-Rustamkulov, Z. et al. (2023). “Early Release Science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRSpec PRISM”. Nature, 614, 659-663.  
-Ahner, E.M. et al. (2023). “Early Release Science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRCam”. Nature, 614, 653-658.  
-Feinstein, A.D. et al. (2023). “Early Release Science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRISS”. Nature, 614, 670-675.  
-Tsai, S.M. et al. (2023). “Photochemically produced SO<sub>2</sub> in the atmosphere of WASP-39b”. Nature, 617, 483-487.

## Moléculas orgánicas cerca de agujeros negros

Una investigación liderada por la Universidad de Oxford y en la que participa el IAC ha conseguido estudiar, por primera vez, las diminutas moléculas de polvo conocidas como hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) en la región nuclear de tres galaxias activas luminosas, utilizando datos espectroscópicos de los instrumentos de última generación del James Webb.

Mientras que trabajos anteriores sugerían la destrucción de las moléculas PAH en esta clase de galaxias, este estudio revela que, sorprendentemente, las PAH pueden sobrevivir en las proximidades del agujero negro central de las galaxias, incluso en presencia de fotones muy energéticos que podrían fragmentarlas. Una de las posibles explicaciones es que estos hidrocarburos están protegidos por grandes cantidades de gas en la región nuclear de las galaxias. Para la comunidad científica, este resultado es de una gran relevancia, especialmente para los equipos de investigación que estudian desde la formación de planetas y estrellas hasta las galaxias más distantes y débiles. “Adquirir conocimientos sobre las moléculas PAH es clave, especialmente en entornos extremadamente ricos en gas y polvo donde los diagnósticos tradicionales suelen fallar debido al elevado oscurecimiento”, afirma **Cristina Ramos Almeida**, investigadora del IAC que ha participado en el estudio. “El siguiente paso -añade- es observar más galaxias para estudiar un conjunto representativo de la población de galaxias activas”.

REFERENCIA:  
-García-Bernete, I. et al. (2022): “A high angular resolution view of the PAH emission in Seyfert galaxies using JWST/MRS data”. A&A, 66, L5, 12 pp.



## Luz intracumular en cúmulos de galaxias

Liderado íntegramente por el IAC, un estudio ha obtenido el análisis más completo hasta la fecha de la denominada luz intracumular, un tipo de luz difusa y muy débil que proviene de estrellas en cúmulos que no están unidas gravitatoriamente a ninguna galaxia. El resultado ha sido posible gracias a los datos obtenidos por el James Webb del cúmulo galáctico SMACS 0723, situado a más de cinco mil millones de años luz de distancia. La investigación proporciona nuevas pistas sobre los procesos de formación de los cúmulos de galaxias y sobre las propiedades de la materia oscura.

“En este estudio demostramos el gran potencial del James Webb para poder observar algo tan débil”, explica **Mireia Montes**, primera autora del artículo. “Esto nos va a permitir estudiar cúmulos de galaxias más lejanos y con mucho más detalle”, añade.

Pero, además, las observaciones también proporcionan nuevas pistas sobre las propiedades de un misterioso componente de nuestro universo: la materia oscura. Las estrellas que emiten la luz intracumular siguen el campo gravitatorio del cúmulo, lo que convierte a este tipo de luz en un trazador excelente de la distribución de materia oscura. “El James Webb nos permitirá caracterizar con una precisión sin precedentes la distribución de materia oscura en estas estructuras gigantes y arrojar luz sobre su naturaleza última”, concluye **Ignacio Trujillo**, segundo autor del trabajo.

REFERENCIA:  
-Montes, M; y Trujillo, I. (2022): “A new era of intracluster light studies with JWST”, ApJL, 940, 2, L51.

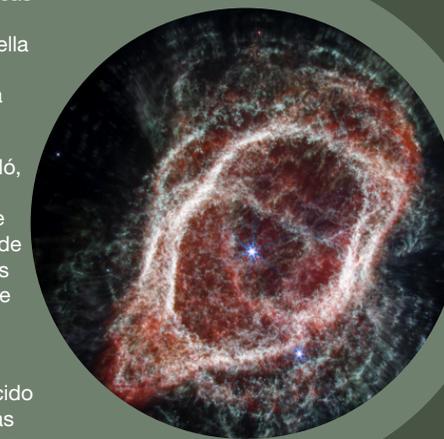
## La nebulosa del Anillo del Sur y el origen de su peculiar morfología

Gracias a los primeros datos del James Webb, se han obtenido pruebas de que la compleja morfología de la Nebulosa del Anillo del Sur se produjo por la muerte de una estrella que formaba parte de un sistema de al menos otras dos, y posiblemente tres, estrellas invisibles que habrían creado las formas alargadas y curvilíneas de esta nebulosa. Además, por primera vez, al combinar las imágenes infrarrojas de este telescopio con los datos existentes del observatorio Gaia, de la ESA, se ha podido determinar con precisión la masa de la estrella central antes de que creara la nebulosa. En el estudio, liderado por la Universidad Macquarie de Sidney (Australia), han participado cerca de 70 investigadores, entre ellos miembros del IAC, que han analizado una decena de imágenes de gran detalle obtenidas con este telescopio.

Para reconstruir la escena y esclarecer cómo pueden haberse creado las formas de esta nebulosa, se calculó, en primer lugar, su masa inicial, descubriendo que la estrella central tenía casi tres veces la masa del Sol antes de expulsar sus capas de gas y polvo. Tras esas eyecciones, ahora tiene aproximadamente el 60% de la masa de nuestro astro. Posteriormente, el equipo se centró en determinar qué podría explicar las formas de las coloridas nubes de gas y polvo, retrocediendo miles de años en el tiempo. Mientras que algunas estrellas expulsan sus capas en solitario, los resultados sugieren que había algunas compañeras que podrían haberse unido a la estrella central antes de que esta empezara a crear la nebulosa del Anillo del Sur.

“Esta estrella es ahora más pequeña y caliente, pero está rodeada de polvo frío”, explica **Verónica Gómez Llanos**, investigadora del IAC y miembro del equipo: “Creemos que todo ese gas y polvo que vemos esparcido por todas partes debe proceder de esa única estrella, pero fue arrojado en direcciones muy concretas por las estrellas compañeras”, señala. Según **Arturo Manchado**, también del IAC y coautor del artículo, “la razón por la que estas estrellas compañeras son ahora invisibles podría deberse a que, o bien son lo suficientemente tenues como para ocultarse, camufladas por el brillo de las dos estrellas centrales más brillantes, o bien se han fusionado con la estrella moribunda”.

REFERENCIAS:  
-Este trabajo ha sido destacado en la portada del número de diciembre de la revista Nature Astronomy.  
-De Marco, O. et al (2022): “The messy death of a multiple star system and the resulting planetary nebula as observed by JWST”, Nature Astronomy, 6, 1421-1432.



# Carlos Sánchez Magro

## Pionero de la astrofísica infrarroja

### "Estrellas" del infrarrojo

En los años 70, empezaron a desarrollarse en la comunidad internacional las técnicas de detección infrarroja de la radiación cósmica. **Carlos Sánchez Magro** por parte española, del IAC, y **Mike Selby** por parte inglesa, del Imperial College de Londres, fueron quienes desarrollaron y explotaron esta nueva modalidad de detección de los objetos celestes en España, en el Observatorio del Teide, usando el mayor telescopio infrarrojo (IR) de su época, el ahora llamado "Telescopio Carlos Sánchez" (TCS).

Hasta entonces, la visión estelar del Cosmos se restringía casi exclusivamente a la observación en la ventana óptica. La radiación infrarroja puede atravesar las zonas de polvo interestelar con mayor facilidad que la radiación en el visible. De modo que la limitación en el rango espectral óptico impedía a los astrónomos el acceso a regiones muy oscurecidas, como el centro de nuestra galaxia o el acceso a estrellas recién nacidas.

La detección infrarroja representó uno de los avances tecnológicos que más influyó en el progreso de la astrofísica en la década de los 70 y 80 y, por ende, del conocimiento del Universo. Con ella se abrían innumerables frentes de investigación y campos para explorar: miles de estrellas lejanas ocultas en el óptico, estrellas cercanas recién nacidas oscurecidas por nubes de polvo... y ¿cómo serían las galaxias externas vistas en el infrarrojo?

Por otra parte, el dominio en este rango espectral exigía desarrollar técnicas novedosas, tales como detectores IR enfriados a temperaturas criogénicas, espectrómetros IR, la interferometría IR o la corrección en los datos de la alta emisión IR de la atmósfera terrestre. Esto último exigía el conocimiento de la turbulencia atmosférica y la optimización de los medios de detección, campos en los que Carlos Sánchez Magro también fue un precursor.

Este astrofísico, en estrecha colaboración con Mike Selby, se lanzó a resolver todas esas cuestiones. Muchos eran los problemas a solucionar, tanto técnicos como procedimentales y de análisis e interpretación, porque la detección IR de los objetos celestes no era tan directa como en el óptico debido a que todo lo que nos rodea, hasta el mismo telescopio, irradia en IR. La radiación propia de los objetos vendría contaminada por todas estas fuentes. Muchos retos abiertos y una infatigable actividad, animada por una permanente ilusión y generosidad.

MERCEDES PRIETO, JESÚS JIMÉNEZ FUENSALIDA Y ANTONIO MAMPASO, astrofísicos del IAC

### Apuntes de una vida

Carlos Sánchez Magro nació en Valladolid el 26 de julio de 1944. Estudió Ciencias Físicas en Madrid. Recién licenciado, con el trabajo "Instalación y puesta a punto de un comparador de placas fotográficas", dirigido por el Prof. **José María Torroja**, comenzó a trabajar en el Departamento de Astronomía y Geodesia de la Universidad Complutense y en octubre de 1968 se desplazó a Tenerife con el fin de realizar triangulaciones geodésicas mediante la observación de satélites. Allí, **Francisco Sánchez** le reclutó para su proyecto de organizar el instituto de astrofísica español germen del futuro IAC.

Tras su llegada a Canarias, comenzó a impartir docencia a futuros ingenieros y físicos en materias como física, óptica y técnicas astronómicas. Impartió un curso monográfico de doctorado sobre "Astronomía Infrarroja" y, más adelante, de "Instrumentación y técnicas astronómicas". Esta última asignatura la inauguró durante el primer curso 1975/76 del Programa Nacional para Formación de Investigadores en Astrofísica, uno de los pilares fundamentales para reunir la cantera científica del futuro IAC. Al mismo tiempo, puso en marcha un instrumento para medir la luminiscencia atmosférica y fue designado enlace para la colaboración científica entre el Imperial College de Londres y el Observatorio del Teide, con la mirada puesta en desarrollar la astronomía en el infrarrojo. Dirigió la prospección del Observatorio del Teide para astronomía infrarroja.

En 1972, obtuvo en la Universidad de La Laguna (ULL) el grado de Doctor en Ciencias Matemáticas, con la calificación de sobresaliente cum laude, por su tesis "Luz Zodiacal y Actividad Solar", dirigida por Francisco Sánchez. Dos años más tarde ganó en concurso oposición la plaza de profesor adjunto de "Óptica y Electricidad". Su camino académico le llevó a ocupar la cátedra de Astrofísica (Instrumentación y Técnicas) en la Facultad de Química de la ULL en 1984. Por aquel entonces, aún no se había creado la Facultad de Físicas.

Carlos Sánchez Magro falleció en Tenerife, por un aneurisma cerebral, el 5 de julio de 1985, tan solo seis días después de la solemne inauguración del IAC y los Observatorios de Canarias. Tenía solo 40 años.

Curriculum completo de Carlos Sánchez Magro en la página web de la asociación Sociedad Astronómica Syrma, integrada por aficionados a la Astronomía principalmente de Valladolid (España), con motivo de I Ciclo de Conferencias "Carlos Sánchez Magro", organizado en el Auditorio del Museo de la Ciencia de su ciudad natal del 6 al 10 de mayo de 2009.



## Resumen de contribuciones

### Caracterización del Observatorio para la observación IR:

- Estudio de las condiciones del Observatorio del Teide para la observación astronómica.
- Espectro del centelleo atmosférico sobre el Observatorio del Teide.

### Tipo de objetos observados y estudiados en el IR cercano:

- La corona solar, novas, supernovas, estrellas, estrellas binarias, regiones HII, nebulosas planetarias, galaxias externas, cúmulo globular, catalogación de nuevas estrellas infrarrojas...

### Desarrollo de instrumentación:

- Interferometría Speckle en el IR cercano.
- Espectrómetro enfriado criogénicamente para la astronomía en el IR cercano.
- Telescopio automático para fotometría y polarimetría de la luz zodiacal.
- Diseño de la parte óptica y mecánica del telescopio IAC-80.
- Diseño del autoguiador del telescopio IAC-80.
- Diseño de un fotómetro estelar.
- Diseño de un telescopio de 10 pulgadas para observación de la Corona Solar.
- Diseño y construcción de un fotómetro IR para la detección de ocultaciones lunares.
- Diseño y construcción de una cámara infrarroja con detector de 32 elementos.
- Prediseño de un interferómetro de 50 m de línea de base para medidas de diámetros estelares.
- Diseño del ISOPHOT-S, el primer instrumento científico español para la observación desde el espacio, un espectrofotómetro infrarrojo que formó parte del satélite ISO de la ESA.

### DONACIONES:

Carlos Sánchez Magro donó 44 libros de su biblioteca científica personal a la Biblioteca del IAC.



Carlos Sánchez Magro. A la derecha, con el astrofísico Antonio Mampaso y el ingeniero Rafael Vilela. © Rafael Vilela/ IAC

### TESIS DOCTORALES:

Tesis doctorales leídas: 2

- "Observaciones en el Infrarrojo de áreas seleccionadas del Plano Galáctico" (1983), Mercedes Prieto Muñoz, Universidad de La Laguna
- "Población estelar y colores integrales en el Infrarrojo de los Cúmulos Globulares" (1985), Carlos Martínez Roger, Universidad de La Laguna

Tesis doctorales en curso (en el momento de su fallecimiento): 6

- "Comportamiento óptico de sistemas telescópicos limitados por difracción" Maximino J. Galán Núñez
- "Análisis bidimensional de imágenes astronómicas" Sergio González Martín-Fernández
- "Resolución espacial astronómica por ocultaciones lunares e interferometría Speckle" Jesús Jiménez Fuensalida
- "Equilibrio energético en regiones HII" Antonio Mampaso Recio
- "Distribución Estelar en el Infrarrojo Cercano sobre el Plano Galáctico" Francisco Garzón López
- "Desarrollo de un espectro-fotómetro de análisis clínico por conteo de fotones" Roberto López López

### PUBLICACIONES: >40

### LIBRO: 1

*Astronomical techniques*, por Carlos Sánchez y Mike Selby

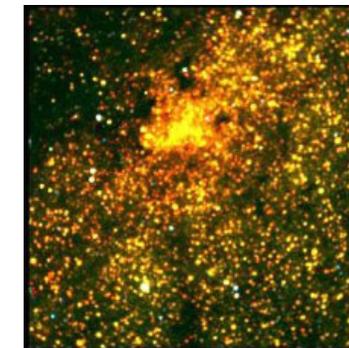
El principal objetivo de este libro es describir las técnicas utilizadas para recibir el mensaje electromagnético disponible de los objetos celestes como un canal de comunicación unidireccional.

(Totalmente escrito por Carlos Sánchez Magro y a falta de revisiones de Mike Selby, este libro no fue concluido ni publicado debido al fallecimiento prematuro de ambos autores.)

## El primer mapa estelar profundo en infrarrojo de nuestra galaxia

Hasta los años sesenta, pocos astrofísicos se habían ocupado de observar el cielo en el infrarrojo (IR), esto es, usando detectores sensibles a longitudes de ondas mayores que la visible. La mayoría de los estudios y observaciones se realizaban en el rango visible u óptico del espectro electromagnético. Esto tenía una limitación, la luz visible que sale de las estrellas se va extinguiendo con la distancia debido a la presencia de polvo en el espacio interestelar. La luz infrarroja se extingue unas 10 veces menos que la óptica, así puede atravesar mejor el espacio interestelar y se pueden ver estrellas mucho más lejanas.

¿Por qué era importante la observación infrarroja? Con las observaciones ópticas, incluso las estrellas más luminosas, solo era posible detectarlas si estaban situadas a 2-3 kpc del Sol (como referencia, la distancia desde el Sol hasta el centro de nuestra galaxia es de unos 10 kpc). No se conocía la naturaleza y distribución de las estrellas lejanas más allá de varios kpc desde el Sol. La naturaleza de las estrellas que poblaban las regiones centrales de nuestra galaxia era desconocida. En los años setenta, ya más desarrollada la técnica de observación IR, en Estados Unidos se hicieron dos cartografiados o mapeos de objetos IR para caracterizar la estructura profunda de nuestra galaxia. Pero estos mapeos no eran lo suficientemente profundos para llegar a detectar la población estelar en la región central de nuestra galaxia. Fue entonces cuando **Carlos Sánchez Magro**, investigador del Instituto de Astrofísica de Canarias y catedrático de la Universidad de La Laguna, y **Mike Selby**, profesor del Grupo de Astronomía del Imperial College de Londres, colaboraron en el desarrollo de una idea novedosa para detectar nuevas estrellas a distancias lejanas del Sol, algunas incluso más allá del centro de nuestra galaxia. Detectarían estrellas con una magnitud límite 10 en la banda K frente a las 3 detectadas por el cartografiado estelar ya existente "Two Micron Sky Survey". Se podrían detectar estrellas muy lejanas dependiendo del tipo, y las más luminosas, incluso más allá del centro galáctico. Para ello utilizarían el Colector de flujo IR de 1,5 m (actual Telescopio Carlos Sánchez, TCS) del Observatorio del Teide, en Tenerife, el mayor telescopio IR en la época (*ver más información sobre el TCS en esta revista*). Con un fotómetro infrarrojo de un solo canal, barrerían bloques del cielo para cubrir el área deseada (Figuras 1 y 2).



Mapa del plano galáctico obtenido con el instrumento CAIN en el Telescopio Carlos Sánchez, en el Observatorio del Teide. © IAC

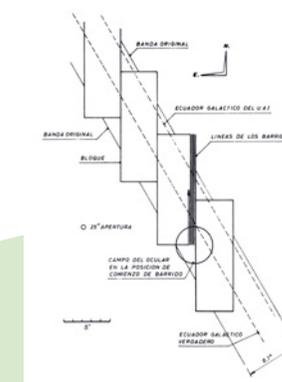


Figura 1. Esquema del diseño de barridos dentro de bloques para cubrir un área del cielo a lo largo del Ecuador Galáctico.

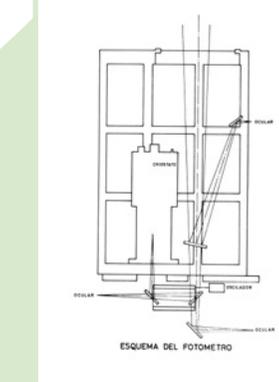
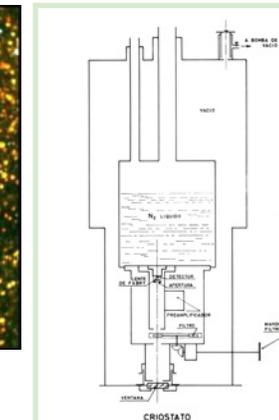


Figura 2. Esquemas del criostato y del fotómetro del telescopio Carlos Sánchez.

En 1978, Carlos Sánchez Magro y Mike Selby, con sus estudiantes respectivos, **Mercedes Prieto Muñoz** y **Anthony W. Jones**, empezaron el cartografiado estelar profundo de nuestra galaxia en los filtros H y K del IR cercano y en la dirección del centro galáctico. Este fue el primer cartografiado profundo en el infrarrojo cercano realizado en el mundo y con él se desarrollaron dos tesis doctorales, las de los estudiantes mencionados. Lo más destacado fue encontrar una población muy numerosa de estrellas muy masivas, alrededor del centro galáctico, población de objetos muy luminosos y enrojecidos, con una densidad espacial muy alta, que probablemente fueran supergigantes dentro de los 90 pc centrales de nuestra galaxia.

#### REFERENCIA:

-Jones, A.W.; Selby, M.J.; Prieto Muñoz; y M.; y Sánchez Magro, C. (1984). "A survey of faint, near-infrared sources towards the centre of the galaxy". A&A, 138, 297-302.



Imagen de la Vía Láctea © Cielos de Canarias, Daniel López

Los cartografiados en el IR de nuestra galaxia continuaron en el IAC liderados por **Francisco Garzón**, actualmente investigador del IAC y catedrático de la ULL. Carlos Sánchez Magro fue inicialmente su director de tesis, pero falleció antes de que esta concluyera. Ambos construyeron un modelo de distribución estelar galáctico para comparar con las observaciones del cartografiado IR mencionado anteriormente (Jones et al. 1984). Por primera vez se tenía certeza de la distribución de las estrellas de nuestra galaxia en un plano de acuerdo con la distribución del gas obtenida de las observaciones en radio, y en un esferoide central.

REFERENCIA:  
-Garzón, F.; Sánchez-Magro, C.; y Prieto, M. (1986). "Near infrared stellar counts and a model of galactic distribution". A&A, 1551, 63-71.

Después de esta investigación, se han seguido detectando en el IR estrellas lejanas de nuestra galaxia, caracterizando las diferentes componentes estelares, como el bulbo, el disco, los brazos espirales y la barra. Estas observaciones, lideradas por Francisco Garzón, se han ido haciendo cada vez con más precisión usando telescopios cada vez más grandes e instrumentos cada vez más sofisticados para que las observaciones fueran más y más reveladoras. Actualmente se están realizando con el Gran Telescopio Canarias (GTC) y el instrumento de última generación, EMIR (*más información sobre el mismo en esta revista*), diseñado y construido en el IAC con la colaboración de otras instituciones internacionales y del que Garzón fue Investigador Principal. Este instrumento puede observar simultáneamente estrellas de nuestra galaxia de diferentes tipos y a diferentes distancias. Asimismo, galaxias externas también de diferentes tipos y a todas las distancias, lo que equivale a galaxias existentes en distintas edades del Universo, desde épocas próximas al Big Bang hasta la actualidad.

## Galaxias externas en el IR

### UN ANILLO DE FORMACIÓN ESTELAR EN NGC 2841

Del estudio y observación de nuestra galaxia se pasó a la observación de otras galaxias, la primera de ellas fue NGC 2841, también liderada por Carlos Sánchez Magro. Realizó este estudio, la primera vez que se obtenía el cartografiado de una galaxia externa en el IR, en colaboración con **Eduardo Battaner**, compañero de la universidad; con **John Beckman**, entonces recién incorporado en el IAC desde el Reino Unido como Coordinador de Investigación; y con su estudiante, **Mercedes Prieto**. Juntos iniciaron una nueva y pionera línea de investigación observando la distribución estelar en el IR de galaxias espirales externas y cercanas con el objetivo de conocer sus características más allá de lo ya conocido de las observaciones en el visible.



NGC 2841 es una galaxia espiral SA(r)b ubicada en la constelación de la Osa Mayor. ©NASA, ESA, and the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble

Cuando observamos en bandas ópticas vemos principalmente estrellas de la población estelar con edades intermedias, pero no se ven bien las estrellas muy azules, jóvenes y recién nacidas, que emiten principalmente en el ultravioleta y aún están rodeadas y enrojecidas por el polvo. En cambio, en el IR sí podríamos detectarlas.

La galaxia NGC 2841 se observó en los filtros J, H y K con un fotómetro IR de un sólo canal en el telescopio de 1,5 m en el Observatorio del Teide. Los mapeos se realizaron "barriendo" el cielo para obtener la imagen bidimensional de la galaxia. El teórico del grupo, Battaner, hizo un modelo de una forma geoméricamente elegante para corregir la luz de la galaxia de la extinción interna por polvo interestelar. Empleó una técnica mejorada basada en la distribución observada del gas hidrógeno atómico y molecular.

En galaxias espirales, la observación óptica permite detectar principalmente las características de la población estelar de edad intermedia, y la observación IR, las de edad vieja y las muy jóvenes. Una combinación de observaciones ópticas e infrarrojas proporciona una caracterización muy completa de la distribución estelar y de las propiedades de las galaxias.

En este estudio se desveló en la galaxia NGC 2841 un anillo con mucha formación estelar invisible en las imágenes

ópticas. Este anillo aumenta en magnitud cuando la luz de la galaxia se corrige de extinción por el polvo intrínseco de la galaxia. Este trabajo fue aceptado en diciembre del 1984 y publicado en 1985, el mismo año de la muerte de Carlos Sánchez Magro.

REFERENCIA:  
-Prieto, M.; Battaner, E.; Sánchez, C.; y Beckman, J. (1985). "Near-infrared mapping of spiral galaxies. I. The SB galaxy NGC 2841: annular structure in the young disc component". A&A, 146, 297-302.

### LA GALAXIA ACTIVA NGC 1068

En esta línea, Carlos Sánchez Magro siguió trabajando con su estudiante **Evencio Mediavilla** en la galaxia activa NGC 1068, observándola en las bandas infrarrojas J, H, K y L. La distribución de radiación IR observada en la región nuclear de la galaxia se pudo explicar mediante una combinación de nubes de polvo en diferentes posiciones y temperaturas superpuestas a las estrellas.



Galaxia activa, M77, NGC 1068 © HST/NASA/ESA/udy Schmidt

REFERENCIA:  
-Mediavilla, E.; y Sánchez Magro, C. (1986). "Near Infrared Surface Photometry of NGC 1068". Astrophysics and Space Science Library, 121, 633.

### LA GALAXIA DE ANDRÓMEDA, UN ANILLO ESTELAR

Entre otras galaxias, se observó en detalle y por primera vez en el IR, con el TCS, nuestra galaxia más próxima, la galaxia de Andrómeda, M31, con la colaboración de todas las personas implicadas en esta línea de investigación, incluidas **Casiana Muñoz Tuñón** y **María Luisa Sánchez Saavedra**. Se encontró una región más azul en la distribución de la población estelar coincidente con el conocido anillo gaseoso en el disco de M31 indicando la asociación de este anillo con regiones de más alta tasa de formación estelar en el disco de la galaxia, análogamente a lo encontrado en la galaxia NGC 2841 (Prieto et al., 1985).



Galaxia de Andrómeda, M31 © NASA/JPL-Caltech

REFERENCIA:  
-Battaner, E.; Beckman, J.E.; Mediavilla, E.; Prieto, M.; Sánchez Magro, C.; Muñoz Tuñón, C.; y Sánchez Saavedra, M.L. (1986). "Near-infrared mapping of spiral galaxies. II. J, H, K profiles of M 31." A&A, 161, 70-74.

### METALICIDAD EN EL BULBO DE M31

La detección de las estrellas viejas y rojas de las galaxias en el IR cercano fue aprovechada para una mejor caracterización de las mismas. El siguiente objetivo fue el estudio con el TCS del bulbo de la galaxia M31 poblado de este tipo de estrellas.



Galaxia M31 © Daniel López/IAC

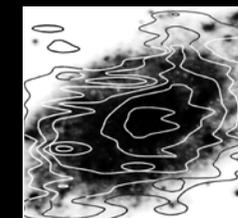
En este caso, el estudio lo realizó Carlos Sánchez Magro con los astrofísicos **Carlos Martínez Roger** y **John Peter Phillips**. El gradiente de brillo del bulbo es más pronunciado que el del disco indicativo de dos estructuras diferentes y

superpuestas en la galaxia, el bulbo con estrellas viejas y el disco con estrellas de edades medias. Se estimó la metalicidad de las estrellas viejas comparando con modelos y se concluyó que la metalicidad media de las estrellas del bulbo decrece desde el centro de la galaxia hacia la parte externa del bulbo.

REFERENCIA:  
-Martínez Roger, C.; Phillips, J. P.; y Sánchez Magro, C. (1986). "Near infrared mapping of M 31." A&A, 161, 237-243.

### LA GALAXIA FLOCULENTA NGC 2403

Esta línea de investigación siguió durante bastantes años, destacando entre otros el estudio de la galaxia espiral floculenta NGC 2403, SAB(s), con un nuevo miembro del grupo, **Jordi Cepa**. Los mapas y perfiles anulares de la galaxia muestran brazos espirales en el IR no bien detectados en el visible desafiando las predicciones estándar de la teoría de "ondas de densidad".



Mapa de isofotas en la banda K superpuesta a una placa de NGC 2403 del Atlas de Galaxias de Hubble.IAC

REFERENCIA:  
-Cepa, J.; Prieto, M.; Beckman, J.; y Muñoz-Tuñón, C. (1988). "Near-infrared mapping of spiral galaxies. III. NGC 2403: spiral structure in the old disc population." A&A, 193, 15-21.

En España, fue Carlos Sánchez Magro quien sentó las bases científicas, instrumentales y los recursos humanos para que la astrofísica infrarroja pudiera desarrollarse para un mejor conocimiento de nuestra galaxia, en particular, y del Universo, en general.

## Otras contribuciones a la investigación infrarroja con sus colaboradores (orden cronológico)



Luz zodiacal sobre el Observatorio del Teide.  
© Daniel López/IAC

**LUZ ZODIACAL**

Nuestro sistema planetario se formó hace 4.800 millones de años a partir de una nube de gas (principalmente hidrógeno y helio) y polvo (restos de otras estrellas) que colapsó por efecto de la gravedad. En el centro se formó nuestra estrella, el Sol, y de los restos que giraban en un disco a su alrededor se formaron los planetas. Ahora podemos ver la luz solar reflejada en la materia que permanece flotando: la luz zodiacal. Se presenta como un resplandor tenue y difuso, que adopta forma triangular y que se extiende a lo largo del plano de la eclíptica, precisamente donde se encuentran las constelaciones del Zodíaco, de ahí su nombre. Al ser tan débil, esta luminosidad sólo es detectable desde lugares con muy baja contaminación lumínica y en noches sin Luna. Carlos Sánchez Magro y el director fundador del IAC, **Francisco Sánchez**, diseñaron juntos un telescopio para su estudio y el de otras fuentes difusas, una experiencia que, aunque no fue en el infrarrojo, despertó la inquietud por la instrumentación en este rango.

REFERENCIA:  
-Sánchez-Magro, C.; Sánchez, F. (1971). "Telescopio automático para fotometría y polarimetría de la luz zodiacal y otras fuentes difusas". *Urania* (Barcelona), Año 56, 273, 10-23.

### EL OBSERVATORIO DEL TEIDE, ÓPTIMO PARA EL INFRARROJO

La fascinación de Carlos Sánchez Magro por la nueva ventana de observación infrarroja abierta al mundo le llevó a realizar con el astrofísico **Pedro Álvarez**, también del IAC, y otros colegas un estudio de las condiciones del Observatorio del Teide para la observación astronómica midiendo la cantidad de vapor de agua y otros parámetros. El resultado fue que en el Observatorio del Teide se daban condiciones óptimas para la observación infrarroja.

REFERENCIA:  
-Sánchez-Magro, C.; Aitken, D. K.; Alvarez, J.; Jennings, R. E.; Polden, P. G.; Tood, J. J. (1971). "Estudio de las condiciones del Observatorio del Teide para la observación astronómica. V. Astronomía infrarroja. Cantidad de vapor de agua". *Urania* (Barcelona), Año 56, Núm. 274, 215-226. *Obs. Astron. Teide*, Publ. N. 15

### LA NOVA CYGNI 1975

Una de las primeras observaciones infrarrojas importantes realizadas fue, en primicia, la de la estrella V1500 Cygni o Nova Cygni 1975, una nova aparecida en la constelación del Cisne en ese año. Se usó el colector de flujo infrarrojo de 1,52 m de Tenerife (el actual Telescopio Carlos Sánchez o TCS) en los filtros H, K y L. Estas observaciones en el IR cercano se publicaron junto con otras en el rango óptico del espectro y en el marco de una colaboración internacional con EEUU, Reino Unido y Países Bajos.

REFERENCIA:  
-Suyarkova, O.; Whitelock, P. A.; Jorden, P. R.; Sánchez Magro, C.; Hurst, G. M.; Williams, T. R.; Bortle, J.; Keen, R. A.; O'Meara, S.; Lukas, R.; Maley, P.; van der Mey, N. A. (1975) "V1500 Cygni (Nova Cygni 1975)". *IAU Circ.*, No. 2864, #2. Edited by Marsden, B. G.

### NEBULOSAS PLANETARIAS, DISTRIBUCIÓN DE POLVO

Se investigó la localización del exceso de emisión en 10 micras observado en muchas nebulosas planetarias. Con este estudio extendieron las observaciones infrarrojas al rango medio del espectro, un filtro de banda ancha desde 8 a 13 micras. Este fue el primer estudio en el IR realizado por Carlos Sánchez Magro con su habitual colaborador desde entonces, **Mike Selby**, del Imperial College de Londres. Realizaron barridos en declinación con un detector único para cubrir el área de la nebulosa.



Nebulosa planetaria M27 (Dumbbell). © Daniel López/IAC

En la mayoría de las nebulosas planetarias observadas encontraron que la emisión por polvo estaba concentrada en la región central.

REFERENCIA:  
-MacGregor, A. D.; Sánchez Magro, C.; Selby, M. J.; Whitelock, P. A. (1976). "The spatial distribution of dust in the planetary nebulae NGC 6537, IC 418, BD +30 3639 and NGC 6572". *A&A*, 50, 389-393.

### REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR, ESTRELLAS MUY ENROJECIDAS

Consciente del interés de la observación en el infrarrojo de estrellas enrojecidas y colaborando con sus colegas británicos, estudiaron regiones donde se forman estrellas rodeadas de polvo e invisibles en las bandas ópticas. Se detectaron tres estrellas en la región de formación estelar HII compacta, G 45.5+0,1. Sus luces atraviesan nubes de polvo frío que las va enrojeciendo con una asombrosa extinción total en el óptico de entre 13 a 30 magnitudes.

REFERENCIA:  
-Jorden, P. R.; MacGregor, A. D.; Selby, M. J.; Whitelock, P. A.; Sánchez Magro, C. (1977). "Infrared sources in the compact HII region G 45.5+0.1". *MNRAS*, 181, 157-161.



Región de formación estelar M42. © Daniel López/IAC

### INTERFEROMETRÍA SPECKLE EN EL IR

Junto con sus colaboradores del Imperial College de Londres, entre ellos **Mike Selby**, idearon una nueva técnica para realizar por primera vez medidas interferométricas de *speckle* en el infrarrojo cercano y medio. Esto permitiría corregir las imágenes infrarrojas de las perturbaciones atmosféricas y aumentar su resolución espacial, mostrando que se puede obtener información limitada por difracción en el infrarrojo.

REFERENCIA:  
-Selby, M. J.; Wade, R.; Sánchez Magro, C. (1979). "Speckle interferometry in the near-infrared". *MNRAS*, 187, 553-566.

### ESTRELLAS BINARIAS PRÓXIMAS, TRANSFERENCIA DE MASA

**John Peter Phillips**, del University College de Londres, se sumó al grupo y juntos observaron en el infrarrojo cercano y medio, JHKLMN, un rango amplio de diferentes tipos de estrellas binarias próximas. Se calcularon las tasas de transferencia de masa entre las componentes de los sistemas binarios. Los datos se obtuvieron con el TCS, usando un detector de InSb enfriado con nitrógeno líquido para los filtros JHKLM y un detector Cu:Ge enfriado con helio líquido para las medidas en la banda N.

REFERENCIA:  
-Phillips, J. P.; Selby, M. J.; Wade, R.; Sánchez Magro, C. (1980). "Infrared observations of binary stars. I." *MNRAS*, 190, 337-351 y *A&A*, 83, 370-374.

### LA CORONA SOLAR, EMISIÓN TÉRMICA

A principio de los ochenta, Carlos Sánchez Magro, con **Antonio Mampaso** y **Mike Selby**, entre otros, empieza un nuevo y novedoso proyecto para observar en el IR, la corona solar. Se intentó medir la emisión térmica del polvo alrededor del Sol predicha por la teoría. Se simuló artificialmente un eclipse de Sol para medir la corona sin la interferencia de la luz central del mismo. Esta emisión no se detectó a pesar de que los errores experimentales estaban muy por debajo de los valores de la emisión esperada. Este resultado, si se confirmara, requeriría una revisión de la dinámica y la física del polvo circunsolar.

REFERENCIA:  
-Mampaso, A.; Sánchez-Magro, C.; Selby, M.J.; MacGregor, A.D. (1983). "Infrared Observations of the Thermal Emission from the Corona". *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 8, 1, 3.



Eclipse total de Sol 2008. © Daniel López/IAC

## TRANSMISIÓN ATMOSFÉRICA EN EL IR MEDIO

Con el fin de mejorar la precisión de las observaciones en el IR, y con **Mike Selby** y **Charles Mattias Mountain**, se determinó la transmisión atmosférica en la banda infrarroja M, 5 micras, para los Observatorios del Teide, en Tenerife, y del Roque de los Muchachos, en La Palma. Esto permitió mejoras considerables en la evaluación del flujo infrarrojo tanto para fotometría, utilizando filtros de banda ancha, como para espectrometría.

### REFERENCIA:

-Mountain, C. M.; Selby, M. J.; Sánchez-Magro, C. (1982). "Extinction corrections in ground based infrared spectrometry". *ESA Galactic and Extragalactic Infrared Spectroscopy*, 85-88.

## UN ESPECTRÓMETRO IR REFRIGERADO, NUEVO DISEÑO

El siguiente reto para el desarrollo de las técnicas de observación en el infrarrojo fue realizar espectroscopía. Un gran paso se dio con el estudio realizado sobre las limitaciones generales impuestas a un espectrómetro enfriado criogénicamente y diseñado para trabajos astronómicos en el IR cercano y medio, desde 1 a 5 micras. Los autores de este trabajo presentaron un nuevo diseño para un espectrómetro de rejilla enfriado criogénicamente capaz de utilizar un detector de InSb lineal de 32 o 128 elementos.

### REFERENCIA:

-Mountain, C.M.; Bingham, R.G.; Sánchez-Magro, C.; Selby, M. J. (1984). "Cryogenically cooled array spectrometer for near-infrared astronomy". *Instrumentation in astronomy V*, 93-100.

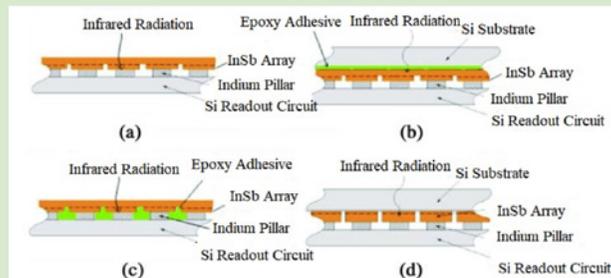


Diagrama esquemático de la ruta de la tecnología del detector del plano focal de InSb.

## CARACTERIZACIÓN EN EL INFRARROJO DE NEBULOSAS PLANETARIAS

Paralelamente siguieron las observaciones fotométricas, esta vez con un nuevo colaborador, **Carlos Martínez Roger**, también del IAC. Se realizaron barridos fotométricos en el infrarrojo para ampliar la caracterización de las nebulosas planetarias, estudiando el tipo de su emisión dominante, así como las características de los granos del polvo requeridas para mantener las altas temperaturas observadas.



Nebulosa planetaria NGC 246.  
© Daniel López/IAC

### REFERENCIA:

-Phillips, J. P.; Sánchez Magro, C.; Martínez Roger, C. (1984). "Near-infrared scans of planetary nebulae". *A&A*, 133, 395-402.

## REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR COMPACTAS

También siguieron las observaciones y estudios con las regiones de formación estelar, esta vez con su colaborador, **Antonio Mampaso**. En las bandas JHKLM con el detector InSb a 63K sobre el TCS, observaron regiones de formación estelar compactas y las nubes moleculares asociadas. Identificaron las estrellas excitantes en su interior altamente enrojecidas, así como una estrella OB recientemente formada.

### REFERENCIA:

-Mampaso, A.; Gómez, P.; Sánchez-Magro, C.; Selby, M. J. (1984). "Infrared observations of HII regions: S 128 and G 134.2+0.8 (GL 333)". *MNRAS*, 207, 465-470.

## EL CÚMULO GLOBULAR MESSIER 4

El último tipo de objeto que estudió en el IR con el fotómetro de InSb montado en el TCS fue un cúmulo globular. Entre los autores estaba **Carlos Lázaro**, otro colaborador. El cúmulo globular Messier 4 es un bello cúmulo de estrellas que se encuentra en la constelación de Escorpio. Observaron estrellas gigantes rojas y de los brazos horizontales. Determinaron características de sus estrellas, especialmente su metalicidad, y la extinción interna del cúmulo.



Cúmulo globular Messier 4. © NASA, STScI, WikiSky

### REFERENCIA:

-Phillips, J. P.; Martínez Roger, C.; Sánchez Magro, C.; Lázaro Vilchez, C. (1986). "Near-infrared photometry of red giant and horizontal branch stars in M 4". *A&A*, 161, 257-263.

## EL CENTELLEO ESTELAR ATMOSFÉRICO SOBRE EL OBSERVATORIO DEL TEIDE

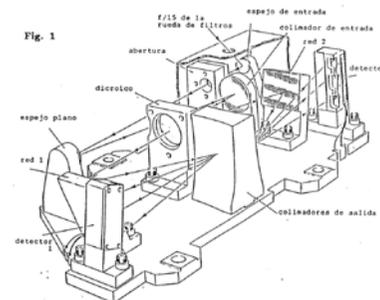
Su último estudio, iniciado antes de su fallecimiento, fue realizado con sus colaboradores **Jesús Jiménez Fuensalida** y **Javier Fuentes** y con el ánimo de mejorar la calidad de las observaciones infrarrojas en el Observatorio. Midieron la varianza y el espectro de potencia del centelleo atmosférico sobre el Observatorio del Teide, a 2.400 m de altitud, en las ventanas atmosféricas J, H, K y L, utilizando un telescopio de 50 cm de apertura. Los resultados están de acuerdo con las predicciones teóricas. Así, la distribución teórica de la turbulencia, junto con datos experimentales de la velocidad del viento, permitirían predecir correctamente el espectro de potencia estelar observado.

### REFERENCIA:

-Fuentes, F. J.; Fuensalida, J. J.; Sánchez-Magro, C. (1987). "Measurements of the near-infrared stellar scintillation above the Observatorio del Teide (Tenerife)". *MNRAS*, 226, 769-783.

## ISOPHOT-S, UN ESPECTRÓGRAFO PARA EL SATÉLITE INFRARROJO ISO

Carlos Sánchez Magro hizo el diseño inicial del instrumento ISOPHOT-S para llevar a cabo espectrofotometría de baja resolución de fuentes astronómicas en el rango de 2,5 a 12 micras. Tras su fallecimiento, fueron sus colaboradores, el astrofísico experto en Óptica **Roberto López** y **Francisco Garzón**, entre otros, quienes siguieron con el desarrollo



Esquema de ISOPHOT-S.

### REFERENCIA:

-López, R., Arribas, S., Díaz, J.J.; García Huete, J.; Garzón, F., González, J.C., Mediavilla, E., Pérez, A.M., Rodríguez, L.F., Rodríguez Espinosa, J.M., Sánchez, V., Selby, M., Wells, M. (1990). "ISOPHOT-S: Un espectrógrafo para el satélite infrarrojo ISO". II Reunión Nacional de Óptica. Santiago de Compostela.

del mismo. El sistema es parte integrante del fotopolarímetro ISOPHOT, uno de los cuatro instrumentos instalados en el plano focal del telescopio infrarrojo a bordo del satélite ISO, el cual ha generado un gran número de literatura científica.

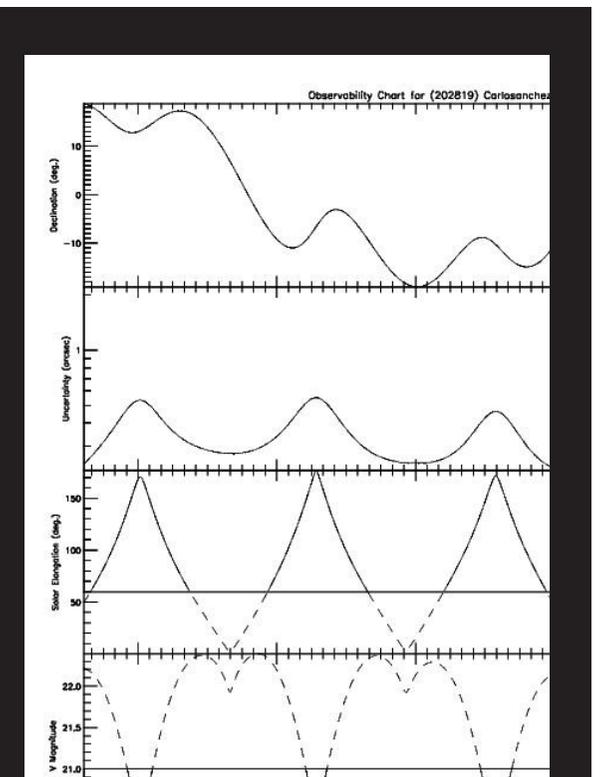


Gráfico de observación del asteroide "Carlos Sánchez".

## ASTEROIDE "CARLOS SÁNCHEZ"

El 26 de septiembre de 2008, el astrónomo aficionado **Juan Lacruz** descubrió desde el Observatorio de La Cañada -estación J87 del Minor Planet Center de la Unión Astronómica Internacional-, en Ávila, el asteroide 2008 SY81 (202819), al que puso de nombre "Carlosanchez" en honor del astrofísico español y distinguido miembro del IAC, destacando así su papel como "pionero en astronomía infrarroja" y "experto en el desarrollo de nueva instrumentación astronómica, incluido el telescopio infrarrojo del Observatorio del Teide e instrumentos espaciales."

CARLOS SÁNCHEZ MAGRO

# "La astrofísica es teórica y observacional, pero necesita instrumentos"

Carlos Sánchez Magro fue el primer profesor que me encontré al llegar a La Laguna para hacer la especialidad en 1981, mi primer contacto con la astrofísica y la instrumentación, en particular en aquella asignatura de Óptica Astronómica.

Fue algo especial lo que me ocurrió con Carlos. Me descubrió una faceta de la astronomía y la astrofísica que yo no me había planteado y que, aún hoy, a pesar de sus esfuerzos, sigue siendo un tema muy abandonado por la enseñanza y los profesionales en ese campo. No solo aquí, en toda Europa y me atrevería a decir que en todo el mundo.

Con Carlos empecé a acercarme a los telescopios de verdad y a los instrumentos. El telescopio infrarrojo de 1,5 m (hoy, Telescopio Carlos Sánchez, TCS), en el Observatorio del Teide, fue durante más de dos años un campo de batalla y de prácticas. En realidad, era una verdadera tortura: noches frías en que, si no fallaba un detector, lo hacía el *chopper*, y si el fotómetro rojo iba bien, entonces cascaba el telescopio. O bien goteaba humedad por algún sitio.

Cuando llegó el Nova 4 (ordenador *mainframe* de Data General) al IAC, se subió el Nova 2 al Observatorio. Carlos, **Mike Selby** y **Martyn Wells** se empeñaron en conectarlo a la impresora de cinta de papel de télex, para leer los datos al ordenador simultáneamente a la impresión. Creo que fue entonces cuando me lo gané definitivamente.

Subía muchas veces con él en la moto o en el Land Rover. En aquellos tiempos, nadie se planteaba cuestiones de seguridad. Sobre todo, al bajar, con la niebla de Las Lagunetas en toda la recta...

Como a la vez empecé a hacer cosas con **Maximino Galán** (Chiqui) en laboratorio y a ayudar en instrumentos que no funcionaban -comparador, esferómetro óptico, telescopio Razdow...-, Carlos le encargó a Chiqui que se responsabilizara de mí. Y lo primero fue darme una mesa donde tenerme localizado cuando no estaba en clase.

Allí me halló Carlos unos días después de la "flamante fiesta" por el nombramiento del IAC como Organismo Autónomo dependiente del Ministerio de la Presidencia de Gobierno, con Javier Moscoso al frente. No sé si me buscaba exactamente a mí o simplemente me encontró en el despacho frente al de Chiqui. Estuvimos charlando, preguntándome por lo que yo quería hacer. Y empecé a definir mi futuro (eso sí, sin decírmelo y saltándose todo lo que yo tenía pensado). No recuerdo la frase o palabras exactas, pero lo que me dijo me marcó para siempre y en mi cabeza suena algo así como: "La astrofísica es teórica y observacional, pero necesita instrumentos, y los instrumentistas son un recurso escaso e inestimable". O esta otra: "En el IAC hay investigadores a montones, pero para hacer ciencia buena hay que ser los primeros, y eso requiere ideas e instrumentos que permitan obtener los datos. Es responsabilidad de los instrumentistas que eso se consiga y todos

los departamentos en el IAC tienen que trabajar para conseguirlo". Es curioso cómo él no hablaba casi nunca de ingenieros, sino de instrumentistas. Creía en los astrónomos, físicos e ingenieros que se dedicaban a hacer astronomía instrumental.

Una mañana, en el aula en Biológicas, le conté el proyecto que llevaba con Chiqui para **Manuel Antonio González de la Rosa**. Un rato después, cuando crucé la calle y entré en la casa de Mecánica, ya me estaba esperando Chiqui con la noticia de que las pruebas que estaba haciendo en laboratorio se iban a convertir en un instrumento para oftalmología y que iba a ser el tema de mi tesis doctoral. Aquello fue genial, ¡claro! Pero Chiqui estaba escribiendo aún su propia tesis, así que no podría dirigírmela. El director iba a ser Carlos, quien había salido zumbando de Biología para proponerle a Chiqui convertir aquel proyecto en trabajo de tesis (y eso sabiendo que mi idea era acabar la carrera e irme a EEUU a hacer el doctorado).

Justo cuando nos mudamos al edificio nuevo, antes de la inauguración oficial, nos citó a **Rafael Navarro** y a mí en su despacho y nos habló de un proyecto que habían presentado a la ESA, basado en el diseño de un doble espectrógrafo IR diseñado por **Martyn Wells**. Carlos quería que Rafa se hiciera cargo del proyecto y que yo fuera el instrumentista que llevara la integración. Rafa le dijo que a él no le interesaba y que iba a irse del IAC. A la semana siguiente de la inauguración, me vino a buscar al taller de Mecánica, donde estaba haciendo pruebas de ajustes del IAC-80 para ver cómo íbamos a montar los espejos de modo que fuese fácil alinearlos y no hubiese que hacer filigranas como con el "Metro y medio". El caso es que pasamos la tarde en su despacho hablando de mi futuro. Él pretendía que, en cuanto acabara la tesis, me fuera a San Diego, donde conocía a alguien que trabajaba con instrumentación a temperatura de helio líquido para el IR medio y que aprendiese las técnicas para poder hacerme cargo del instrumento para el satélite. Recuerdo fundamentalmente la ilusión que tenía en poder hacer un instrumento para el espacio y cómo era capaz de ilusionarme a mí, a pesar de que estaba redirigiendo la idea de mi propio futuro.

Lamentablemente murió dos o tres días después, cuando el trabajo de tesis sólo estaba a medias. Y yo me quedé terminando un trabajo que nadie quiso asumir como director. Bueno, sí, Manuel Antonio me propuso presentarla en Medicina, pero claro, iba a ser un poco raro un astrofísico doctor en Medicina...

Pero no fue lo último que me relacionó con Carlos. Casi un año después, me llamó el coordinador de Instrumentación, **Pedro Álvarez**, para decirme que tenía que ponerme al día en deposición de películas delgadas porque nos habían concedido 25 millones de pesetas para comprar una máquina con la que hacer filtros y espejos que había pedido Carlos el año anterior.



Construcción de la cúpula del telescopio inglés (posteriormente, Telescopio Carlos Sánchez en Izaña). © IAC

Lo cierto es que la influencia de Carlos, de sus ideas acerca de cómo debía hacerse la astrofísica han marcado y guiado mi carrera profesional. Gracias a él, puedo presumir de haber participado en las mejoras del TCS, en el diseño y desarrollo de prácticamente todos los instrumentos infrarrojos que hemos asumido en el IAC y han definido su evolución instrumental y la mía propia. Desde el pequeño en tamaño y peso, pero grande en importancia como instrumento (ISOPHOT-S), pasando por la primera cámara infrarroja del Observatorio del Teide (CAIN, en su criostato de 6 pulgadas), hasta los grandes espectroradiómetros, como LIRIS, con su metro cúbico de tamaño, que sirvió más de 15 años en el WHT. Y ¡cómo no!, EMIR, con sus 5 toneladas, que ha pasado a ocupar uno de los focos Nasmyth del GTC, en el Observatorio del Roque de los Muchachos. Ahora, para ese gran dinosaurio de 10,4 m de diámetro medio, estamos terminando de afinar el sistema de Óptica Adaptativa, que dará un haz de luz limpio de turbulencia en el otro foco Nasmyth. Diseñado inicialmente para aportar un foco corregido de turbulencia atmosférica al espectrógrafo FRIDA, se estrenará con la cámara de desarrollo y con un instrumento (GRANCAIN), diseñado por mí durante el encierro en la pandemia con grandes opciones, pero que por las premuras y falta de presupuesto se conformará con darnos "pronto" fotos y con ellas ciencia, espero que comparable a la del Telescopio Espacial James Webb.

Siempre he creído que ese era el camino. Que la astrofísica, la ciencia, necesita de instrumentación, sea a través de científicos instrumentistas o ingenieros que crean en el desarrollo de la ciencia. Y sí, lo más importante es poder estar en la vanguardia de los descubrimientos científicos y astrofísicos, y para ello hay que estar y hacer instrumentación, tecnología, de vanguardia. Todo lo demás -gestión, administración, protocolos, ingeniería...- han de estar al servicio de la observación astronómica más avanzada.

ROBERTO LÓPEZ,  
astrofísico e ingeniero óptico del IAC

## "PADRE CULTURAL"

Muchos compañeros y amigos del IAC manifiestan deber mucho profesionalmente a Carlos Sánchez Magro. Entre ellos, **Esteban González**, técnico del Taller de Mecánica, a quien animó y orientó en sus estudios siendo un adolescente. "Siempre digo que fue mi 'padre cultural', mi 'tutor', porque le debo mi formación. Gracias a él, estudié Formación Profesional, en la especialidad de Mecánica, y acabé trabajando en un centro científico y tecnológico tan importante como el IAC". Todos los que le conocieron coinciden en que era "un personaje", "muy estricto", pero, a la vez, "muy campechano", "con quien jugar al fútbol" y "capaz de sacar un pañuelo del bolsillo, hacerle cuatro nudos y ponérselo a la cabeza para ayudarte con pico y pala a construirte una casa bajo un sol que rajaba las piedras", recuerda **Abelardo Díaz**, delineante técnico del IAC. "Yo también le debo -añade- que me obligara a estudiar. Iba a sus clases de oyente y gracias a su empeño, finalicé mis estudios. Lo último que me viene a la memoria es que quedé con él para hacer un fotómetro en el que estábamos trabajando: *Mañana a primera hora te traigo los rodillos y el esquema para que lo sigas dibujando*, me dijo. Pero no apareció, había fallecido esa noche de un derrame cerebral. Aún le estoy esperando..."

Testimonios de ESTEBAN GONZÁLEZ DÍAZ  
y ABELARDO DÍAZ TORRES, IAC



Calle en honor de Carlos Sánchez Magro en Valladolid, su ciudad natal.

# Su importancia en el desarrollo de la astrofísica española

El Prof. Carlos Sánchez Magro, catedrático de Astrofísica de la Universidad de La Laguna y destacado investigador del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), llegó a Tenerife en octubre de 1968, poco después de casarse en Valladolid con M<sup>a</sup> Dolores Tejedo Bellver. Curiosamente, lo mismo que hizo a mediados del siglo XIX el astrónomo inglés Piazzi Smith y yo mismo. Los tres nos vinimos a observar a Canarias justamente en luna de miel.

El recién licenciado Sánchez Magro, que había comenzado a trabajar en el Departamento de Astronomía y Geodesia de la Universidad Complutense de Madrid, vino con la misión bien concreta de realizar durante un par de años observaciones de satélites con cámaras balísticas para triangulaciones geodésicas entre África y Europa dentro del programa “Euroáfrica”, liderado por el Instituto Geográfico Nacional de Francia.

No muchos meses después de su llegada, tuve con él una larga conversación que recuerdo muy bien. Yo le había llevado a un taller situado en los bajos del estadio de fútbol del Club Deportivo Tenerife para que le retocasen un “escarabajo” Volkswagen de segunda mano que se había comprado, y mientras se lo arreglaban paseamos sin prisas, arriba y abajo, la calle de San Sebastián de Santa Cruz de Tenerife. Este diálogo peripatético resultó ser muy trascendente para él, para mí y, me atrevería a decir, que también para la astronomía española.

Pese al poco tiempo transcurrido, yo ya me había dado cuenta de que Carlos tenía madera de investigador y poseía unas habilidades técnicas que nos eran muy necesarias en el incipiente Observatorio del Teide. Durante nuestro paseo santacrucero descubrí facetas de su carácter y calidades humanas que me encantaron. Hasta tal extremo que me atreví a desvelarle, ya entonces, algunos de mis sueños. Visiones de futuro que terminó haciendo también suyas, y que le llevaron a convertirse en mi mejor y más eficaz colaborador.

No recuerdo en qué momento Carlos y su mujer decidieron continuar en Canarias para participar plenamente en el



El presidente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), el Prof. Primo Yúfera, visitando los primitivos talleres del IAC, en compañía de los doctores Francisco Sánchez y Carlos Sánchez Magro. © IAC

proyecto de lo que hoy es el Instituto de Astrofísica de Canarias, pero lo que sí sé es que su entusiasmo y buen hacer fueron decisivos para que este cuajase.

Por entonces, yo había llegado a la conclusión de que el cielo de Canarias poseía condiciones únicas para la moderna observación astronómica y que valía la pena ponerlo en “explotación científica”, pero que para sacarle todo el provecho era imprescindible conseguir la cooperación internacional (en aquella época en España era imposible pensar en hacer ciencia en serio). Además, sabía por experiencia que solo si nuestros colegas de fuera comprobaban por sí mismos las increíbles propiedades astronómicas del cielo de Canarias, podríamos negociar con ellos este intangible como recurso natural, y lograr a cambio el conocimiento y la instrumentación astronómica, bienes de los que carecíamos. Y lo sabía pues así lo había hecho con el “Telescopio de Burdeos” con todo éxito.

Mi sueño era conseguir atraer a los astrofísicos europeos, que por entonces andaban buscando emplazamientos adecuados a sus nuevos telescopios,



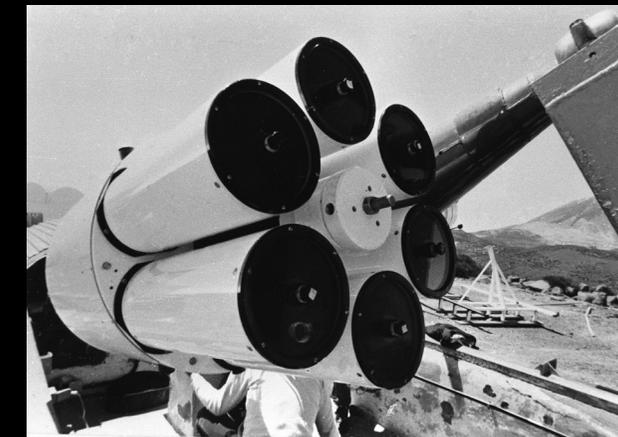
para que los instalasen en Canarias y que, a cambio, nos ayudasen a formar jóvenes, para con ellos crear un centro de excelencia aquí. Carlos Sánchez era el tipo de persona adecuada. Completó rápidamente su formación en el extranjero y se puso a trabajar a mi lado, codo con codo, para lograr el instituto de astrofísica español que necesitábamos. No me equivoqué. Y, más aún, con el tiempo gané el mejor amigo que he tenido en mi vida.

De todo lo que hizo en su corta pero fructífera existencia, yo solo voy a resaltar lo que a mi juicio ha dejado más huella en la astrofísica española.

La ciencia básica precisa y genera instrumentación científica que produce tecnología avanzada. Y esta es una vía eficaz para transferir esta tecnología al tejido empresarial. Por eso, desde el principio decidimos que nuestro instituto tendría una pata importante dedicada a la instrumentación. El Prof. Sánchez Magro fue el encargado de lograrlo, y lo hizo tan bien que la Instrumentación Astronómica, para tierra y espacio, es ahora una de las fortalezas del Instituto de Astrofísica de Canarias y de la ciencia española. El ejemplo más palpable es la construcción del Gran Telescopio Canarias (GTC), el mayor y más avanzado telescopio óptico-infrarrojo del mundo en estos momentos. Estoy convencido que no lo habríamos conseguido si Carlos no hubiese iniciado el Área de Instrumentación del IAC, y el diseño del mini telescopio avanzado que hoy se llama IAC-80. Hay que recordar, también, que el Prof. Sánchez Magro diseñó el primer instrumento científico español para el espacio, un espectrógrafo infrarrojo que voló en un satélite ISO de la Agencia Europea del Espacio.

Al Prof. Sánchez Magro se le puede considerar como el padre de la astrofísica infrarroja española: estudió y puso en evidencia las condiciones de las cumbres de Canarias para las observaciones infrarrojas; participó en la instalación del telescopio de 1,5 m del Observatorio del Teide, el primer telescopio especialmente concebido para observar en el infrarrojo (que hoy lleva su nombre); obtuvo los primeros resultados científicos y realizó las primeras publicaciones españolas de astrofísica infrarroja; formó a los primeros astrofísicos infrarrojos del país; desarrolló los primeros instrumentos IR. Hoy, esta rama de la astronomía ha florecido en España gracias al buen trabajo inicial del Prof. Sánchez Magro. Ejemplo notorio del nivel tan alto alcanzado es el instrumento EMIR para el GTC, un reto jamás logrado que permite hacer, como nunca se ha hecho, imagen y espectroscopía de gran campo en el infrarrojo próximo.

Me parece de justicia sacar a la luz otra faceta del Prof. Sánchez Magro, bastante desconocida, que es la de haber sido pionero en la implantación en España de las energías



Fotopolárimetro de seis canales, en el Observatorio del Teide. © IAC

renovables. Fue él quien organizó el primer curso en Canarias sobre energía solar, del que salieron todos los primeros expertos en esta materia. Entre otras cosas, desarrolló un concentrador solar que dio origen a la empresa Energía Solar Española (ESE).

Terminaré glosando la actividad docente del Prof. Sánchez Magro, reseñando su participación directa en todas las iniciativas que han conducido a que la Universidad de la Laguna sea un referente en Astrofísica, con numerosas tesis doctorales en este campo, y el IAC, una escuela de posgrado que atrae a jóvenes científicos e ingenieros de todo el mundo. La primera de estas iniciativas en las que participó fue en 1975, en el Programa Nacional de Formación de Investigadores en Astrofísica, dirigido a brillantes recién licenciados de cualquier universidad, y del que salieron los primeros doctores de esta especialidad de la Universidad de La Laguna. Él mismo dirigió o participó en numerosas tesis doctorales, entre ellas la del guitarrista del grupo Queen, Brian May, del que era además amigo.

La segunda aportación docente de Carlos Sánchez Magro fue iniciar la Licenciatura de Física en cuarto curso, solo con la especialidad de Astrofísica dirigida a jóvenes físicos con vocación por conocer el Universo. Dos años después, se puso en marcha la licenciatura completa. Al Prof. Sánchez Magro le sobrevino la muerte en 1985 inesperadamente, cuando era director del Departamento y estaba en plena actividad.

Creo que la vida y obra del Prof. Carlos Sánchez Magro ha sido muy importante para la astronomía española, un ejemplo claro para la juventud, que merece sobradamente el reconocimiento público.

FRANCISCO SÁNCHEZ MARTÍNEZ,  
director fundador del IAC

# Un adelantado en fotometría infrarroja

Carlos Sánchez Magro fue uno de los astrofísicos más sobresalientes del mundo. A pesar de su temprana muerte, su surco en la astrofísica española ha sido profundo y fértil y, aún hoy, seguimos recogiendo el fruto. Era un gran especialista en instrumentación, destacando especialmente en fotometría infrarroja, en la que fue un distinguido pionero. Son muchos los descubrimientos que llevó a cabo con el telescopio que hoy lleva su nombre, TCS. A modo de ejemplo, obtuvo el primer mapa de un disco galáctico en infrarrojo. Sus grandes méritos científicos no pueden apreciarse en su currículum, por vasto que este sea, porque tenía muchas más ideas que las que publicaba. Era también encomiable en él su preocupación porque una ciencia pura como es la astrofísica tuviera repercusión inmediata en el bienestar y en el progreso de su entorno.

Si su contribución a la ciencia del Cosmos fue admirable, más lo fue su personalidad. Castellano hasta los tuétanos (no se puede entender a Carlos sin su Valladolid de nacimiento, sin su Castilla ancha), era amante de la naturaleza, del pueblo y de la gente sencilla. Era amigo de los humildes, de los pobres, de los extraños, de los despistados, de los solitarios, de los sentimentales, de los apasionados. Tenía el don de sonsacar pronto, del fondo del alma de aquellos que le interesaban, sus más íntimas confesiones y sus más profundos sentimientos. Le gustaba aquel verso de Machado: "Para conversar/ preguntad primero/ después, escuchad". Era un gran enemigo de la hipocresía, de la falsedad, de la ostentación, de la mediocridad, de la comodidad.

Los que le conocían, o bien le temían, o bien le amaban. Convivir con él era vivir una aventura imprevisible en cada momento. En los lugares más desarraigados tenía un amigo con una visión original de la vida, con quien compartir pan, vino y compasión. Era sencillo en sus costumbres, en el humor, en el amor, en la amistad, y era sencillo incluso en su grandeza. Sus destempladas y francas risotadas aún resuenan en los oídos de todos los que le queríamos.

Es imposible olvidarle, como científico y como amigo. Tenía la mirada y el corazón de los hombres verdaderamente grandes.

EDUARDO BATTANER  
astrofísico y catedrático emérito  
de la Universidad de Granada

Conocí a Carlos durante la década de los setenta, cuando yo solía viajar a Tenerife para usar el telescopio entonces conocido como el "Colector de flujo infrarrojo de 60 pulgadas", ahora con el nombre de "Telescopio Carlos Sánchez". Era la época del primer desarrollo de la astronomía en el infrarrojo.

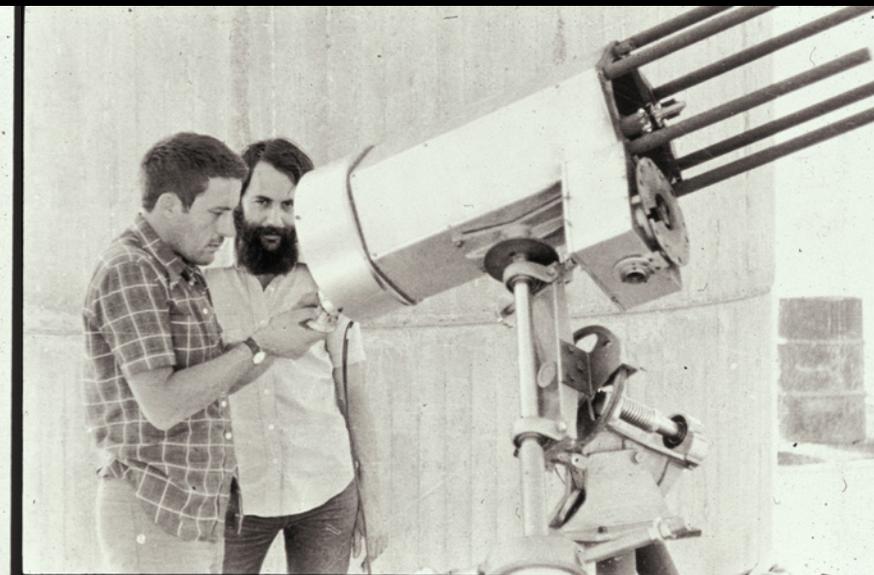
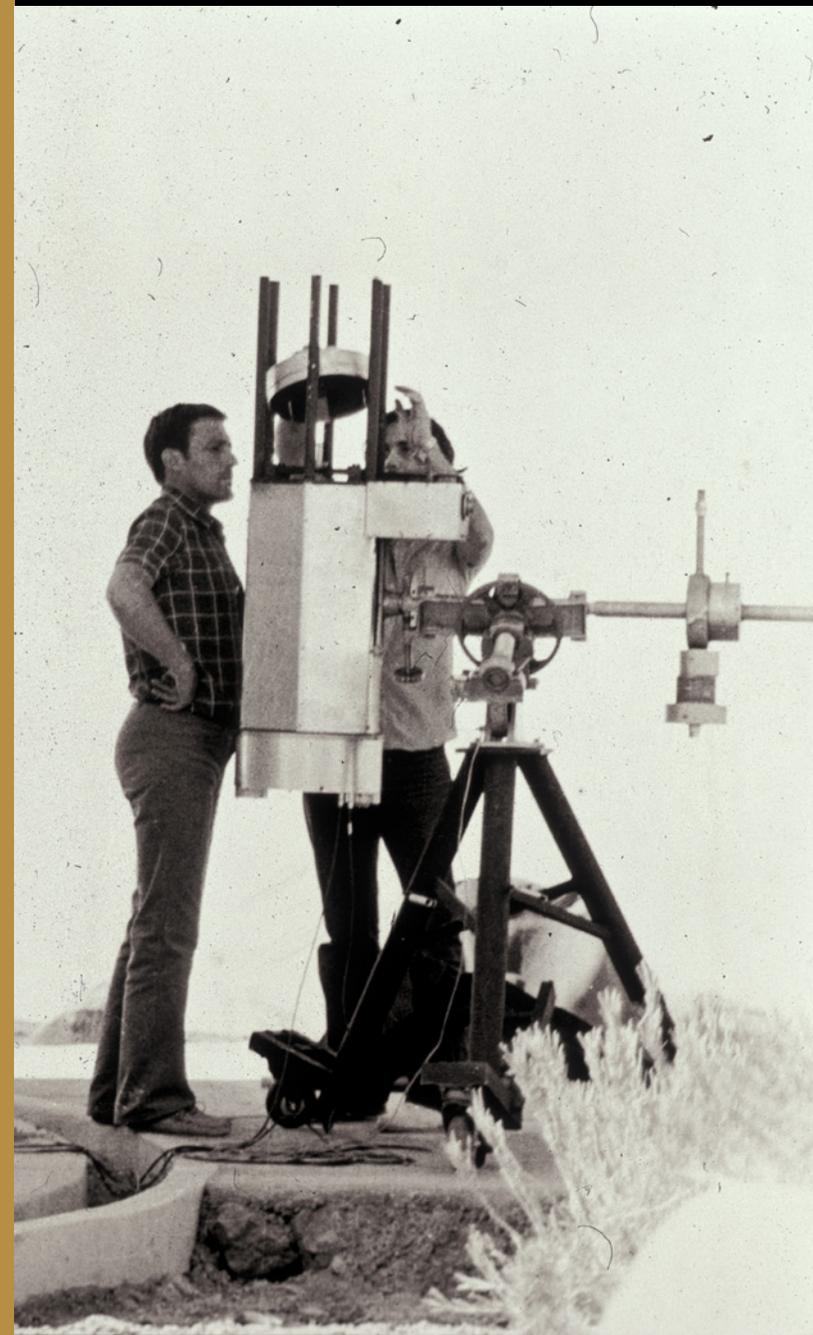
Carlos era uno de los primeros en trabajar con asiduidad en la aplicación de detectores infrarrojos en observaciones telescópicas. Lo hacía como uno de los colaboradores principales de **Michael ("Mike") Selby**, profesor en el Imperial College de la Universidad de Londres. Recuerdo que tenían algunas ideas pioneras, como el desarrollo de un instrumento llamado "Speckle Interferometer", diseñado para optimizar la resolución de las imágenes del telescopio contra la turbulencia atmosférica. Carlos estaba siempre buscando la forma de aumentar la capacidad técnica del entonces joven Instituto de Astrofísica. Junto con **Maximiliano ("Chiqui") Galán**, promovió la construcción del telescopio IAC-80, el primer telescopio profesional diseñado y construido en su totalidad en España. Este telescopio sigue en buen funcionamiento. Es pequeño, pero la experiencia adquirida fue muy valiosa más tarde, cuando el IAC se embarcó en el proyecto del Gran Telescopio Canarias, de 10,4 metros, ahora el telescopio óptico-infrarrojo más grande del mundo, en La Palma.

Carlos me invitó a venir a Tenerife para ocupar el nuevo puesto de Coordinador de Investigación del IAC. Al llegar, la idea fue pasar un año, y hasta dos en Tenerife, pero aquí sigo tantos años después.

Una de las contribuciones astronómicas más interesantes de Carlos fue el primer cartografiado de galaxias externas en el infrarrojo. El artículo con los resultados salió publicado en la revista internacional *Astronomy & Astrophysics* en 1985, el año de su triste fallecimiento. La primera autora fue Mercedes Prieto, entonces una joven investigadora que había sido la estudiante de Carlos, y los otros autores éramos **Eduardo Battaner**, ahora Catedrático Emérito en la Universidad de Granada, y yo.

Carlos llevaba un papel crítico en la formación del área técnica del IAC. Una gran parte de la investigación en el Instituto se basa en la evolución técnica de instrumentación en el óptico y en el infrarrojo, que recibió su primer impulso de parte de Carlos.

JOHN BECKMAN  
astrofísico y profesor emérito del IAC



Carlos Sánchez Magro, con el astrofísico Antonio Mampaso, probando un instrumento en el Observatorio del Teide. © Rafael Vilela/IAC



Carlos Sánchez Magro, con la astrofísica Mercedes Prieto, probando un instrumento en el Observatorio del Teide. © Rafael Vilela, IAC



Carlos Sánchez Magro. En el recuadro superior, con el telescopio que lleva su nombre. © IAC

## CARLOS SÁNCHEZ MAGRO

# Un genio poliédrico

Era un CIENTÍFICO con ingenio, muy riguroso, y un PROFESOR exigente. Tenía una mente tan clara y sus demostraciones eran tan evidentes para él que sus enseñanzas destacaban por el alto nivel y eran muy apreciadas, sobre todo en cursos superiores, como doctorados y másteres.

En ciencia era polifacético, abarcaba tanto las ciencias puras como las ingenierías. Destacó principalmente en las observaciones y diseño de instrumentos en el rango espectral del infrarrojo. Junto con Mike Selby, profesor del Imperial College de Londres, instalaron y explotaron el mayor telescopio infrarrojo en la época, el actual “Telescopio Carlos Sánchez” (TCS). Carlos y Mike, junto con sus estudiantes, realizaron el primer muestreo profundo de estrellas infrarrojas en la dirección del centro de nuestra galaxia, inaccesible hasta entonces con los detectores ópticos.

Tanto en ciencia como en instrumentación tenía muchas ideas, como pusieron de manifiesto el número de tesis doctorales que estaba dirigiendo en el momento de su muerte. Era ingenioso en instrumentos novedosos, como el espectrofotómetro IR que diseñó para el telescopio espacial ISO o el detector IR de 32 elementos para el TCS.

No sólo se interesaba por el diseño y construcción de los instrumentos, sino que además disfrutaba con su instalación y uso. Le gustaban los ajustes al mínimo detalle. Si algo fallaba, podía desmembrar el aparato hasta dar con el problema.

Carlos también era un FILÓSOFO, se preguntaba constantemente para qué estábamos aquí y cuál era el sentido de nuestras vidas. En sus reflexiones, la limitación de nuestra existencia siempre estaba presente.

Vivía CON prisas, por una parte, y SIN ellas, por otra. Con prisas porque, excepto los últimos años, dormía poco para vivir más, con 4 o 5 horas tenía suficiente, como él decía, “voy a dormir deprisa”. Era muy activo, un hombre de acción. Vivía con prisas en el sentido de que devoraba la vida, no se permitía el lujo de divagar, iba de esto a lo otro con decisión y disfrutando de todas las cosas y de todas las personas. Parecía como si presagiara que su vida iba a ser corta y tenía que aprovechar al máximo. Y vivía sin prisas porque, cuando estaba en algo, lo que fuera, el tiempo se paraba, lo vivía al 100%, olvidándose del resto del mundo, el tiempo no existía. Se olvidaba de sus citas, tranquilamente podía llegar a ellas con dos horas de retraso. Las personas que le conocíamos nunca lo esperábamos, y cuando llegaba, la convivencia era tan gratificante y alentadora que fácilmente podíamos olvidar las esperas. Vivía intensamente el presente. Vivió casi 41 años, pero al ritmo que lo hizo bien podrían haber sido 80.

Aunque era un hombre de acción, le gustaba tener por las tardes o las noches sus momentos de reflexión, de tranquilidad, en su mesa-escritorio, con un fondo suave de música clásica o de Ennio

Morricone, con sus libros y escritos. Solía escribir sus sensaciones y reflexiones.

Carlos era ambicioso por naturaleza en el sentido de que se interesaba por todo e iba a por todo, pero también era sencillo y enemigo de protocolos y convencionalismos. Por ejemplo, él trabajó muchísimo para sacar la cátedra, parecía “un hombre pagado a una mesa” y decía que lo hacía especialmente para que su padre, al que adoraba, se sintiera orgulloso de él. Otro ejemplo, en la inauguración del IAC en 1985, poco antes de su fallecimiento, no quiso recoger la Encomienda de la Orden de Alfonso X el Sabio que el Rey de España estaba ofreciendo a las personas destacadas en la construcción del IAC, entre las que se encontraba él, lógicamente.

Carlos no sólo era un gran científico, ingeniero y pensador, también era muy AMIGO de sus amigos. Le atraía mucho el campo, la naturaleza y especialmente la gente sencilla. Era amigo de los cabreros de Anaga y conocido en los barrancos o llanuras más dispares de algún rincón de cualquier parte. Una de sus delicias era coger su “motillo” un día soleado temprano en la mañana y conducir a través del monte de Las Mercedes hacia los montes de Anaga para llegar a Carbonera o Taborno y visitar a sus amigos cabreros y familias. Todos le acogían con regocijo. Se iba con el cabrero y las cabras al monte, mientras la familia le preparaba el almuerzo con papas arrugadas y mojo. También en La Esperanza se iba algún sábado o domingo con Herminio, el lechero de la zona, a cuidar las vacas o a segar el trigo en su pequeña era. Toda la familia de Herminio adoraba a Carlos y pasaban buenos ratos comiendo y riendo.

Las personas se sentían muy a gusto con él porque tenía la particularidad de sacar de ellos lo mejor, de elogiar y destacar aquellas cosas que hacían bien, de querer aprender de ellos y siempre con sentido del humor. Supongo que también tendría sus enemigos, pero yo no sé de ninguno.

Tenía mucho carácter y, según algunos compañeros de trabajo, mucho genio. No dudaba en disparatar, gritar y decir palabrotas ante algún inconveniente. Los que le conocían, “hacían oídos sordos”, porque enseguida se le pasaba, pero los que no le conocían, se asustaban mucho.

Era un buen PADRE, pero siempre sentía no dedicar a sus tres hijas todo el tiempo que hubiera querido. Tantas eran sus actividades que era casi imposible. Pero, como en las otras facetas, cuando estaba con ellas, el disfrute era máximo.

Tenía madera de LÍDER y así era en su ámbito social. Físicamente, tenía un magnetismo y unas vibraciones tan especiales que cualquier persona sensible podía percibir y sentirse atraído por él.

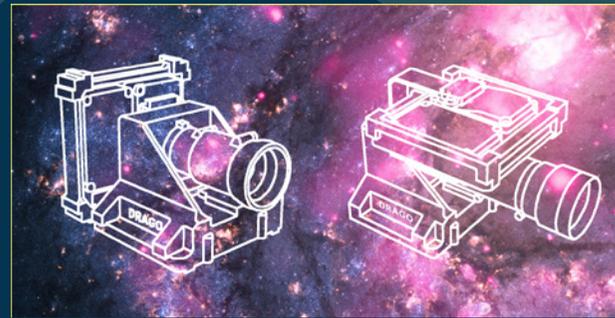
Por encima de todo, Carlos tenía alma de POETA, una sensibilidad exquisita, en especial para percibir las diferentes manifestaciones de la Naturaleza, y sabía plasmarla con su pluma o su cámara de fotos al atardecer. Se debatía entre sus ansias de libertad y sus compromisos adquiridos. Uno de sus sueños, “tener una vaca”. Una vez en su cumpleaños, los amigos le regalamos una vaca blanca y negra de tamaño natural hecha de tela y paja.

MERCEDES PRIETO MUÑOZ,  
astrofísica y exprofesora de la ULL

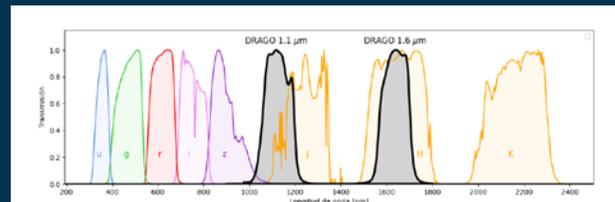
# DRAGO: Observando la Tierra en el infrarrojo

El 4 de enero de 2023 se puso en órbita DRAGO-2, la segunda cámara infrarroja para observación de la Tierra desarrollada con éxito en IACTEC-Espacio, del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Esta cámara es la sucesora de DRAGO-1, enviada al espacio en misión de demostración justo dos años antes a bordo de un cohete Falcon 9 de Space X.

Las cámaras DRAGO (*Demonstrator for Remote Analysis of Ground Observations*) observan en el infrarrojo de onda corta (SWIR, *Short-Wave InfraRed*), concretamente en las bandas de 1,1 y 1,6 micras. En un sistema fotométrico astronómico usual, estas bandas corresponderían a la región del espectro electromagnético un poco más al azul que la banda J y a la zona central de la banda H, respectivamente.



Impresión artística de las cámaras DRAGO-1 y DRAGO-2. IACTEC. © Patricia Chinchilla, IACTEC



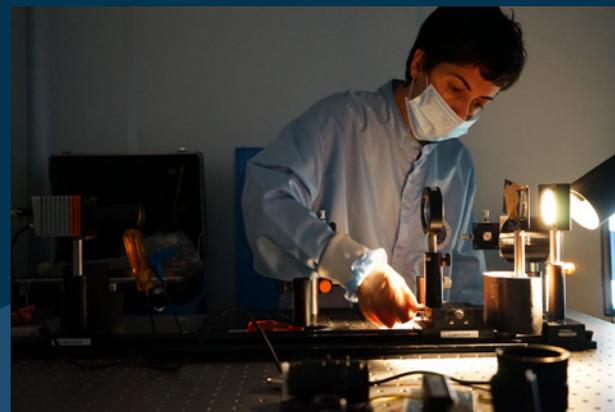
Perfil de los filtros infrarrojos de DRAGO (marcados en negro) comparados con los filtros en visible e infrarrojo cercano de Sloan SDSS u, g, r, i, z (en azul, verde, rojo, rosa y violeta) y los filtros infrarrojos de 2MASS J, H y K (en naranja). © Patricia Chinchilla, IACTEC



Lanzamiento de DRAGO-2 a bordo de un cohete Falcon 9 de Space X. © Space X



Longitudes de onda del infrarrojo.



Alba Peláez, ingeniera óptica de IACTEC-Espacio, trabajando en DRAGO. © IACTEC



Imagen satélite de las Islas Canarias tomada por DRAGO-1. La imagen se ha realizado a partir de un mosaico de imágenes obtenidas por la cámara. © IACTEC

Las cámaras DRAGO suponen un nuevo concepto y enfoque en la observación de la Tierra con fines sociales y científicos. Dos de las principales características que hacen tan especiales estas cámaras son su pequeño tamaño y su bajo consumo. Cada una de ellas cabe en la palma de una mano, tiene un peso de 1 kg aproximadamente y un consumo menor de 6 W, equiparable a una bombilla LED común. Estas propiedades las hacen ideales para su integración en pequeños satélites destinados a la observación de la Tierra, con órbitas LEO (*Low Earth Orbit*), en torno a los 500-700 km de altitud.

El desarrollo llevado a cabo por el equipo de IACTEC-Espacio representa un coste y unos tiempos extremadamente inferiores que otras grandes misiones espaciales con fines similares, sin afectar a su calidad final, pues son capaces de obtener imágenes con gran resolución. Estas cámaras son las únicas cámaras SWIR que pueden trabajar sin refrigerar, gracias a un desarrollo del equipo de IACTEC-Espacio en vías de patentarse. Este hecho hace que, en estos momentos, las cámaras DRAGO sean unos instrumentos únicos, dado que no hay otro pequeño satélite que observe en este rango espectral.

El correcto funcionamiento de estas cámaras en el espacio -en condiciones extremas de vacío, radiación y un amplio rango de temperaturas- requiere de un tratamiento especial, por lo que las cámaras incluyen protecciones frente a la radiación pasivas y activas y un sistema de control térmico pasivo. Además, tener instrumentos en el espacio también afecta al modo en que se almacenan y procesan los datos obtenidos con ellos. Las cámaras DRAGO son capaces de comprimir las imágenes (con y sin pérdida de información), tienen capacidad de cifrado de las mismas y pueden almacenar imágenes obtenidas en más de 250 ciclos orbitales en modo de operación normal. Por último, estos pequeños instrumentos también incluyen algoritmos de súper resolución, que permiten obtener imágenes de mayor calidad, combinando imágenes tomadas con pequeños desplazamientos subpíxel entre ellas.

DRAGO-1 posee un campo de visión de 190 km, a una altura orbital de 500 km, lo que permite, por ejemplo, observar juntas en una única imagen las islas de Tenerife y Gran Canaria. En las



Impresión artística del satélite ALISIO-1. © Open Cosmos.

imágenes de DRAGO-1, cada píxel corresponde a 300 metros. El nuevo modelo, DRAGO-2, puede observar la superficie terrestre con un mayor nivel de detalle, equivalente a realizar un zoom x6 en la visión de DRAGO-1. En DRAGO-2, las imágenes tienen un campo de visión más reducido, de 32 km, y cada píxel corresponde a 50 metros. En una única imagen de DRAGO-2 no cabrían Tenerife ni Gran Canaria al completo, pero sí, por ejemplo, la isla de El Hierro.

## ALISIO-1, EL PRIMER NANOSATÉLITE CANARIO

El IAC lanzará en 2024 su primer satélite propio para observación de la Tierra, ALISIO-1 (*Advanced Land-Imaging Satellite for Infrared Observations*), el cual llevará a bordo una cámara DRAGO-2. Este primer nanosatélite canario contará también con un módulo de comunicaciones ópticas con láser, que permitirá probar una nueva forma de transmisión y recepción de información con los satélites mucho más eficaz que los métodos tradicionales, aplicando tecnologías ampliamente reconocidas en astronomía, como lo es la óptica adaptativa, en el ámbito de las comunicaciones ópticas.

La misión ALISIO-1 no solo permitirá adquirir imágenes de forma autónoma con el instrumento DRAGO-2, sino que además ha sentado las bases para que se puedan abordar misiones de mayor complejidad, como IACSAT-ASTRO1, el primer telescopio astronómico espacial del Instituto de Astrofísica de Canarias.

## ¿PARA QUÉ PODEMOS UTILIZAR DRAGO?

La observación en el infrarrojo permite conocer la estructura de la superficie terrestre igual que haríamos en el visible, reconociendo costas, ciudades, desiertos y vegetación. Pero, además de la información topográfica, el infrarrojo nos ofrece información adicional que no podemos conseguir en el visible.

Un ejemplo de las aplicaciones del infrarrojo de onda corta en la observación de la superficie terrestre es que nos proporciona información relativa a la humedad. El rango SWIR es altamente sensible a los cambios de humedad en el terreno. Esto es



Simulación de imagen esperada de DRAGO-2. En verde se destacan las zonas de cultivo del sur de la isla de Tenerife, visibles en infrarrojo. © IACTEC

de gran utilidad para monitorizar el estado de la vegetación, tanto de bosques como de campos de cultivo. Las bandas de observación de DRAGO, en 1,1 y 1,6 micras, permiten la creación de índices de vegetación útiles para este propósito. Otra aplicación relacionada con la humedad es la monitorización de inundaciones, ya que el infrarrojo permite distinguir las zonas anegadas mejor que el visible.

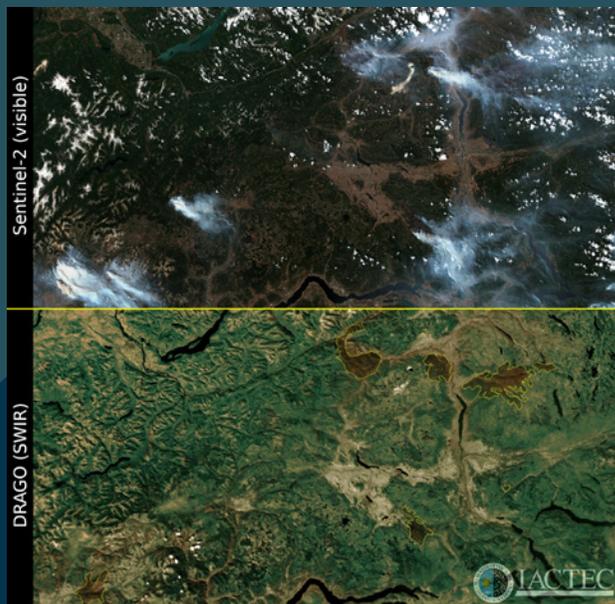
Otra ventaja que el infrarrojo nos proporciona es la posibilidad de ver a través del humo, ya que la mezcla de gases resultante de la combustión permite el paso de la radiación infrarroja mejor que de la luz visible. Esto es de especial relevancia para la monitorización de incendios y de la actividad volcánica, ya que en el infrarrojo cercano podemos distinguir a la perfección las zonas de avance de las llamas o de la lava, que son muy brillantes en estas longitudes de onda, sin que el humo tape nuestra visión. Los servicios de emergencias y de extinción de incendios, por ejemplo, pueden con esta ayuda tomar decisiones sobre las rutas de evacuación y las zonas de intervención más adecuadas en cada momento. También es de utilidad para valorar la magnitud de los daños ocasionados en la vegetación y en las infraestructuras humanas.

El infrarrojo de onda corta puede utilizarse igualmente para detectar vertidos de petróleo en el mar, ya que las emulsiones de petróleo y agua tienen una reflectividad diferente de la del agua pura en el infrarrojo, lo que permite su detección en estas bandas con un mejor contraste que en el visible.

DRAGO-1 es más apropiado para hacer estudios a gran escala, como estudios de la evolución de la nubosidad o de episodios de calima, mientras que estudios de, por ejemplo, el estado de parcelas de cultivo o de los daños ocasionados por una catástrofe natural requerirían el uso de DRAGO-2.

El éxito del proyecto DRAGO es la base del futuro gran proyecto en el que IACTEC-Espacio está involucrado: VINIS. Este instrumento permitirá la observación de la Tierra en visible y en SWIR en 5 bandas de observación simultánea con una resolución 10 veces mejor que DRAGO-2, lo que multiplicará tanto la información recibida como las utilidades que este microsatélite ofrecerá a la sociedad.

PATRICIA CHINCHILLA,  
astrofísica divulgadora de IACTEC-Espacio



Imágenes de satélite de incendios en Columbia Británica (Canadá). Comparación de la imagen en visible de Sentinel-2 (Agencia Espacial Europea, arriba) con la imagen en infrarrojo tomada por DRAGO-1 (abajo). Las zonas más oscuras de la imagen de DRAGO corresponden a focos de incendios, no apreciables en la imagen en visible debido a que aparecen tapados por el humo de los mismos. © ESA/CNES/IACTEC

#### EQUIPO IACTEC-ESPACIO

Investigador principal: **Álex Oscoz Abad**.  
Gestor del proyecto: **José Alonso Burgal**.  
Personal del proyecto: Alba Evá Peláez Santos, Alfonso Ynigo Rivera, Carlos Colodro Conde, David Rodríguez Muñoz, Gara Ramos Rodríguez, Ignacio Sidrach-Cardona Martínez, José Carlos Sanluís Leal, Luis Guirado Fuentes, Pablo González de Chaves Fernández, Patricia Chinchilla Gallego, Roque Giner Tello, Samuel Santana Tschudi, Samuel Sordo Ibáñez, Xana Delpueyo.



IACTEC-Espacio, liderado por el investigador del IAC Álex Oscoz, es un programa integrado en IACTEC, el espacio de colaboración tecnológico y empresarial del IAC, que cuenta con el apoyo financiero –Programa de Capacitación, al amparo del Programa TFINNOVA, del Marco Estratégico de Desarrollo Insular (MEDII) y del Fondo de Desarrollo de Canarias–, y de infraestructuras (edificio IACTEC) del Cabildo Insular de Tenerife. IACTEC Espacio está financiado por el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia del Gobierno de España, y por el Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI).

## El volcán de Cumbre Vieja

Uno de los fines para los que DRAGO fue diseñado es la monitorización de catástrofes naturales. Principalmente, aquellas que pudiesen ocurrir en Canarias, como incendios, vertidos de petróleo o erupciones volcánicas. El papel de DRAGO consiste en aportar imágenes infrarrojas desde el espacio, para ayudar en la gestión y el control de dichas catástrofes. La erupción del 19 de septiembre de 2021 en la isla de La Palma proporcionó un escenario insólito de pruebas para el instrumento DRAGO-1. Y no solo se obtuvieron imágenes desde el satélite. También se tomaron imágenes in situ con el modelo de ingeniería de la cámara DRAGO, una réplica terrestre del que se encontraba orbitando. Gracias a esta prueba de campo se puede observar de una forma empírica el poder de penetración de la radiación infrarroja de onda corta a través del humo, tanto de la propia erupción como de los incendios colindantes. Las partículas de humo que emitía el volcán dispersaban mucho la luz visible, hasta el punto de que a veces bloqueaban completamente la visión. En cambio, el tipo de luz invisible al que es sensible DRAGO atraviesa el humo sufriendo mucha menos dispersión, lo cual permitió distinguir detalles del volcán o de la lava que, de otra manera, hubieran quedado ocultos.

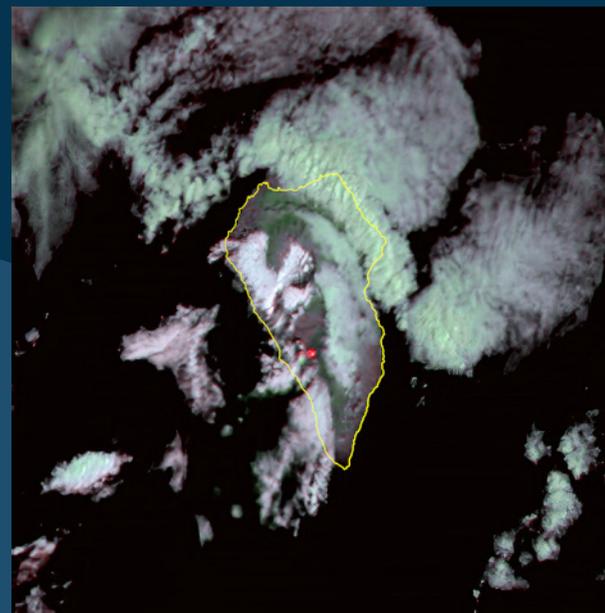


Imagen infrarroja de La Palma obtenida por DRAGO-1 desde el espacio el día 20 de septiembre de 2021 a las 11:30 hora local. La escala de colores elegida para representar la radiación infrarroja (no visible) resalta la presencia del volcán en color rojo. La imagen se tomó a 516 km de altura con una perspectiva de 25° respecto a la vertical. © IACTEC



Una réplica de la cámara Drago-1 tomando imágenes del volcán de Cumbre Vieja. © IACTEC



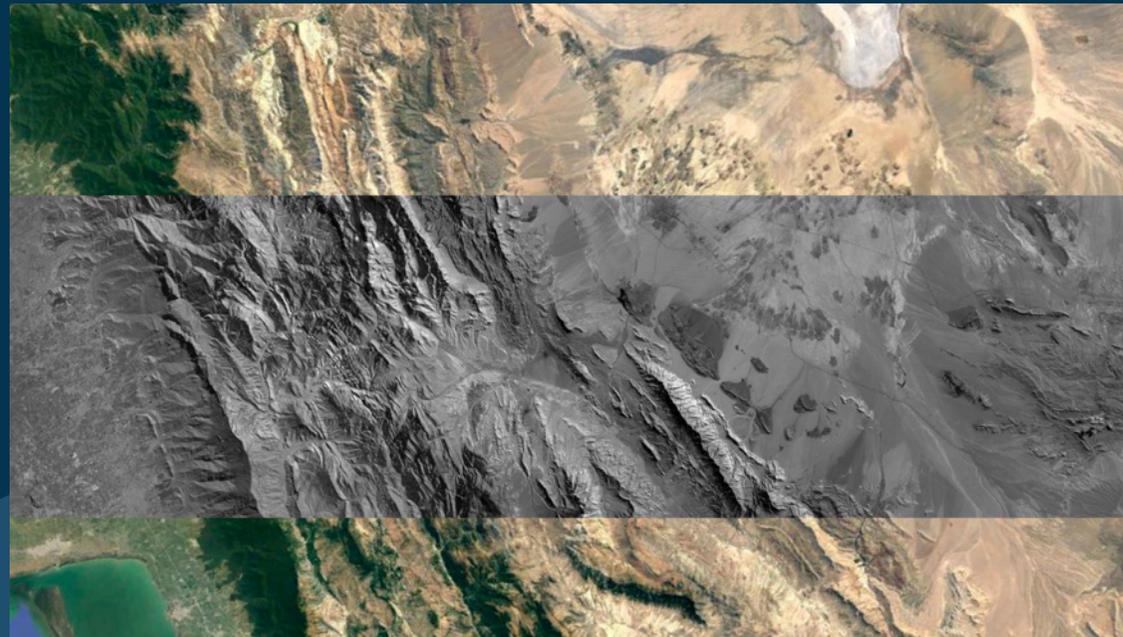
Resultado de la prueba de campo realizada con la réplica de DRAGO-1 el día 22 de septiembre de 2021 a las 08:00 h. local. La imagen superior fue capturada con una cámara de fotos convencional. En la imagen inferior se ha superpuesto la imagen SWIR obtenida por DRAGO en el mismo instante de tiempo, de manera que se aprecia claramente su capacidad de atravesar nubes de partículas como las que emite un volcán. © IACTEC

# Primeras imágenes de DRAGO-2

Las primeras imágenes del instrumento DRAGO-2 enviadas desde el espacio muestran una resolución seis veces mayor que las de su predecesor DRAGO-1, permitiendo distinguir numerosos y diversos fenómenos naturales. Ambas cámaras se complementan al poder emplearse para diferentes casos, dependiendo del tamaño y los detalles del evento que se quiera monitorizar.

Tras las comprobaciones necesarias de todos los subsistemas para verificar su correcto funcionamiento después de su puesta en órbita, el 21 de febrero de 2023 pudieron tomarse las primeras imágenes de DRAGO-2.

La primera imagen publicada por el equipo corresponde a una zona del estado de Mali, una región que se caracteriza por la escasez de agua y el calor extremo, lo que incrementa el riesgo de incendios forestales. De hecho, en la imagen de DRAGO-2 se muestran nuevos focos de incendios. Estos se pueden distinguir más claramente cuando se comparan con las imágenes de días anteriores y posteriores tomadas por SENTINEL-2, una flota de varios satélites de gran tamaño y última generación desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA). La órbita de DRAGO-2 no coincide con las órbitas de SENTINEL-2, lo cual es una gran ventaja, dado que así se pueden complementar sus imágenes.

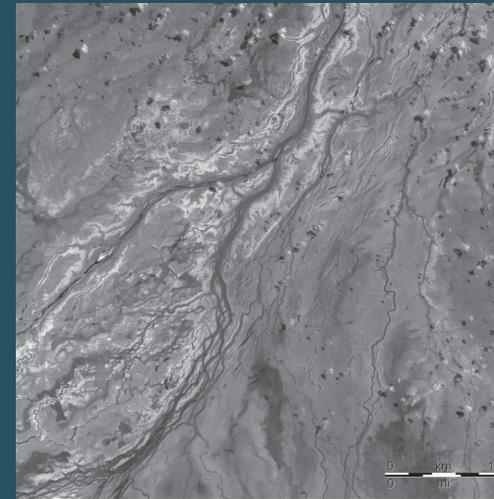


Montañas al sur de Turkmenistán, observadas por DRAGO-2. La imagen se ha superpuesto a las imágenes del satélite Landsat. © IACTEC

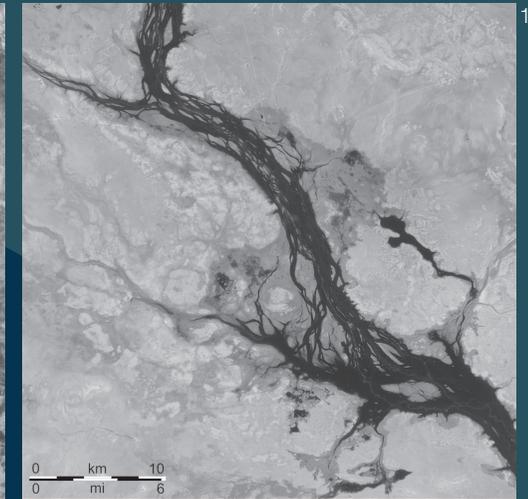
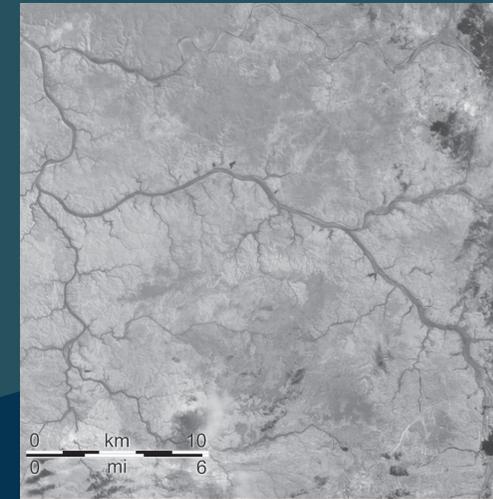
La región seleccionada para la segunda imagen tomada por la cámara infrarroja se corresponde con una zona al sur de Turkmenistán, cerca del Mar Caspio. Se trata de una región con una orografía muy escarpada y con grandes contrastes, todo un reto para una cámara del tamaño de DRAGO-2. A pesar de ello, en la imagen obtenida se distinguen infraestructuras humanas como carreteras y una población, así como el relieve montañoso de la zona.

La tercera imagen recibida pertenece a Mizorán, un estado de la República de la India. En ella se puede observar claramente tanto el gran relieve montañoso que tiene la zona como su extensa vegetación.

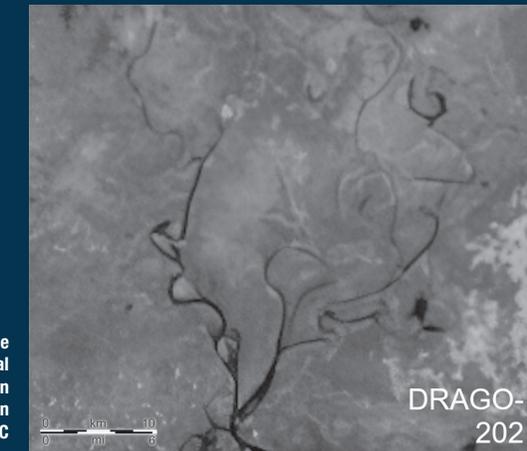
La cuarta colección de imágenes corresponde al estado de Queensland, en Australia. Esta es una zona de grandes contrastes, en la que se distinguen terrenos áridos a pesar de la presencia de los ríos estacionales, que destacan enormemente en el infrarrojo.



Detalles extraídos de la imagen de la región de Queensland, Australia, tomada por DRAGO-2. En ella se pueden distinguir múltiples ríos estacionales característicos de esta región. © IACTEC



Las cámaras DRAGO-1 y DRAGO-2. © IACTEC

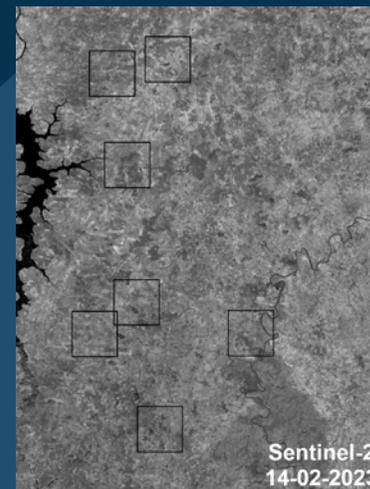


DRAGO-1  
2021

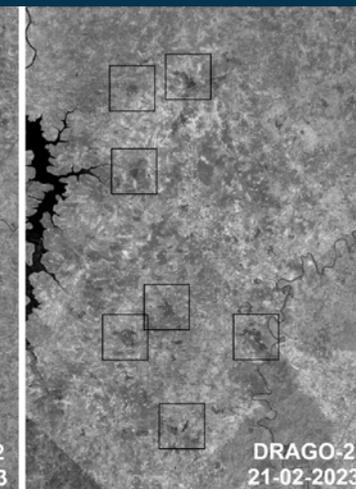


DRAGO-2  
2023

Comparación entre las imágenes de DRAGO-1 y de DRAGO-2 de una región al este de Bangladesh. En ella se pueden apreciar las diferencias en la resolución de ambos instrumentos. © IACTEC



Sentinel-2  
14-02-2023

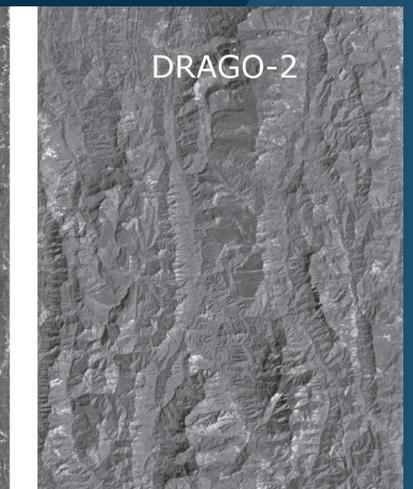


DRAGO-2  
21-02-2023

Comparación entre las imágenes de Sentinel-2 y DRAGO-2 que muestra la evolución de incendios y la generación de nuevos focos en Mali entre el 14 y el 21 de febrero de 2023. Los cuadrados marcan las zonas incendiadas. © IACTEC



SENTINEL-2



DRAGO-2

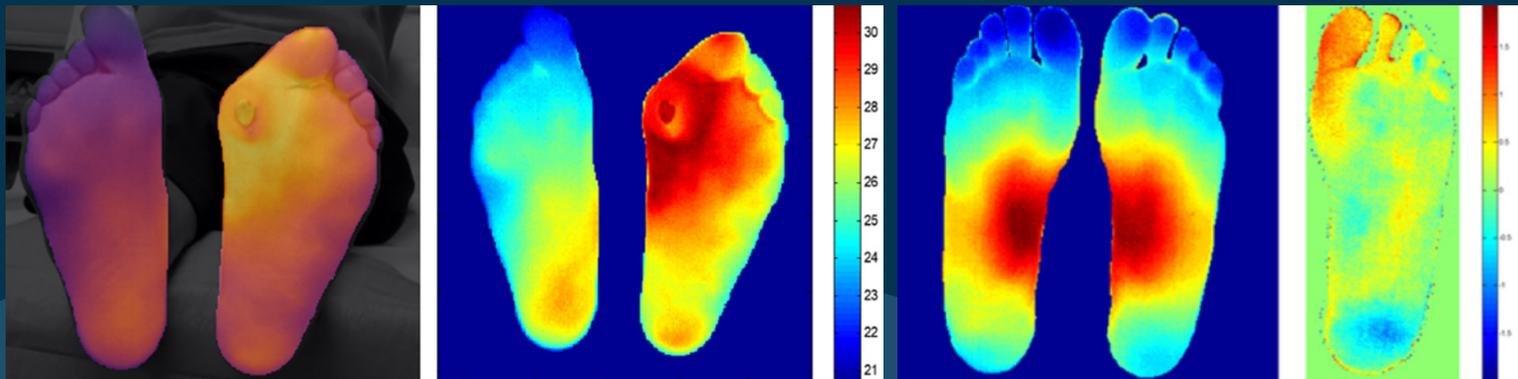
Comparación entre las imágenes de Sentinel-2 y DRAGO-2 para el estado de Mizorán, en la India. © IACTEC

# Tecnología médica

Desde hace décadas, el IAC se ha situado a la vanguardia del desarrollo de instrumentación avanzada para astrofísica en España. Una posición que se reforzó con el diseño y construcción del Gran Telescopio Canarias. Prácticamente desde sus inicios, el IAC ha tenido interés en transferir esta tecnología astrofísica a la medicina. Sin embargo, no ha sido hasta hace tan solo unos años cuando se ha creado un programa específico para ello. Esta oportunidad surgió en 2015, fruto de una estancia del profesor **Juan Ruiz-Alzola**, catedrático de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), especializado en imagen médica. Fue entonces cuando se incorporó como investigador afiliado al IAC con el objetivo de poner en marcha la línea de Tecnología Médica en IACTEC, el espacio de cooperación tecnológica y empresarial del IAC, que tiene por objetivo la transferencia de tecnología e instrumentación astrofísica a la medicina para desarrollar equipamiento biomédico que permita la detección precoz de enfermedades.

## INFRARROJOS Y MICROONDAS PARA ESTUDIAR EL PIE DIABÉTICO

Según las estimaciones de la Organización Mundial de la Salud, 536,6 millones de adultos en todo el mundo padecían de diabetes en 2021. Debido a diferentes causas,



Imágenes térmicas de úlcera en pie diabético y patrón térmico de pie. © IACTEC

estas personas tienen más posibilidades de sufrir una amputación de miembros inferiores. En los últimos años, Canarias se ha situado a la cabeza de este tipo de intervenciones, realizando más de 3.000 amputaciones relacionadas con esta complicación. Se estima que cerca del 50% de las amputaciones asociadas al pie diabético se podrían prevenir con un programa de educación para los pacientes y una adecuada exploración antes de que ocurran las lesiones.

Dentro del programa de Tecnología Médica de IACTEC, se desarrollan tres proyectos que tienen como objetivo principal la detección precoz de úlceras del pie. Sin embargo, la tecnología y técnicas empleadas son extensibles a otro tipo de patologías.

“Se intentó buscar una aplicación médica que se beneficiara de la tecnología desarrollada en el IAC, que tuviera relevancia -por la prevalencia de la enfermedad- y que, regulatoriamente, no fuera compleja, para acortar el tiempo de los test clínicos”, explica Ruiz-Alzola. Por eso se optó por trabajar en aplicaciones que requirieran medidas térmicas, tanto en la piel -como sucede con el proyecto PINRELL, que detecta anomalías térmicas superficiales mediante tecnología infrarroja- como del interior del cuerpo a través de microondas (PROMISSE). “Es un complemento al diagnóstico -explica **Natalia Arteaga**, ingeniera de Imagen Biomédica del programa de Tecnología Médica de IACTEC- pero, sobre todo, una herramienta de monitorización”.

Ambos proyectos surgieron al mismo tiempo. Ruiz-Alzola relata que, “en el caso del infrarrojo térmico hemos integrado cámaras de bajo coste, diseñando y desarrollando el software. Pero para el proyecto de

microondas había que fabricar el sensor, la antena, el radiómetro e integrarlo todo”.

“Posteriormente, surge el proyecto MUTANT para el desarrollo de sistemas artificiales que emulan los tejidos biológicos, estos sistemas se denominan fantasmas y permiten la calibración de los prototipos desarrollados, así como su utilización como herramienta de entrenamiento para personal médico” – comenta **Gara Ramos**, gestora del programa de Tecnología Médica de IACTEC.

## PINRELL

En astrofísica, la tecnología infrarroja permite ver planetas, estrellas u objetos celestes detrás de nubes de polvo. Pero cuando hablamos de su aplicación a la medicina, decimos que se trata de un sistema de termografía infrarroja para detectar, analizar y evaluar diferentes patologías, como podrían ser las afecciones del pie diabético.

PINRELL (*Prototype for INfraREd analysis of Lower Limbs*) opera en el rango visible e infrarrojo térmico y permite detectar anomalías de temperatura a nivel superficial. “Actualmente se han integrado cámaras infrarrojas de bajo coste e intermedio, así como cámaras de gama científica, de modo que existen varios prototipos PINRELL disponibles” -señala Arteaga. El prototipo permite adquirir imágenes multimodales: infrarrojo (IR), visible (VIS) y de profundidad (D) a través de una aplicación desarrollada en Python. “Este prototipo tiene una interfaz gráfica versátil para facilitar el uso de la aplicación por parte de los usuarios. También, se ha llevado a cabo la calibración temporal de estos sensores térmicos y visibles, usando algoritmos de sincronización entre las imágenes adquiridas” -explica **Robabeh Salehi**, ingeniera informática del programa de Tecnología Médica de IACTEC.

Actualmente, PINRELL habilita la creación de una base de datos de imágenes médicas multicanal (VIS/NIR/IR/Depth) que permitirá realizar tanto el análisis como el seguimiento de patrones anómalos de temperatura a nivel superficial, imperceptibles para el ojo humano. Se trata, por lo tanto, de una herramienta que podría suponer un avance en la detección precoz de neuropatías antes de que el daño sea severo, visible e irreversible.

## PROMISSE

PROMISSE (*PROtotype for Microwave System for Subcutaneous anomalies*) es un sistema multifrecuencia de microondas que permite detectar anomalías de temperatura en profundidad.



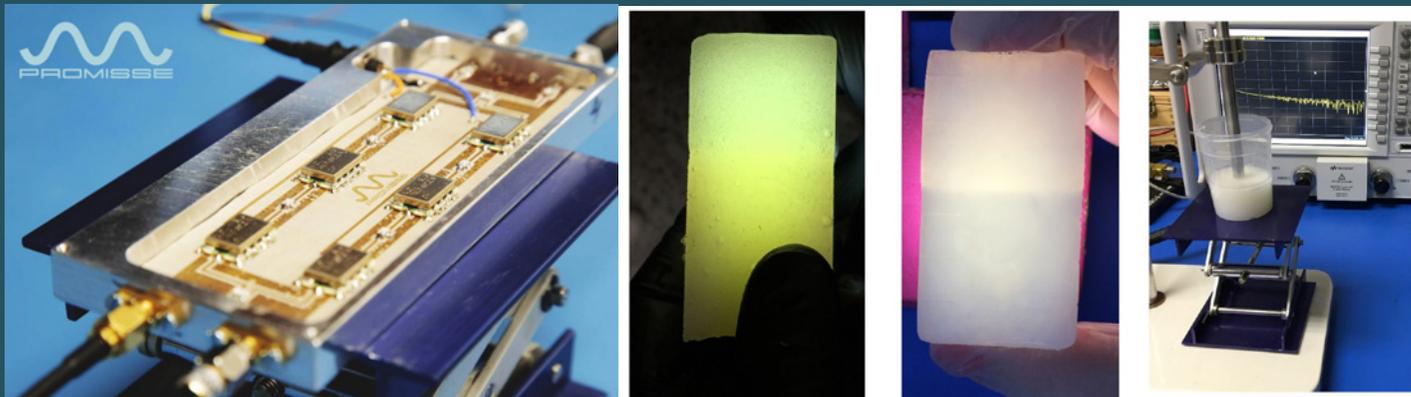
Prototipo PINRELL. © IACTEC

Cuando se mide con infrarrojo, sólo se puede obtener un patrón térmico a nivel superficial en la piel. Como las microondas tienen una longitud de onda mayor, permiten penetrar en los tejidos. Una vez se obtiene un patrón anómalo con la imagen térmica infrarroja, lo que se hará es tomar medidas puntuales en los sitios donde se ha detectado esa anomalía para medir, en profundidad, de dónde procede. Arteaga añade: “En realidad, esta tecnología se podría aplicar a cualquier patología que produzca un aumento de temperatura, como una inflamación o un tumor. Por ejemplo, cualquier cáncer que esté cerca de la piel, y que no sea profundo, como podría ser el de mama”.

La dificultad a la que se enfrentan estos sensores es que tienen que discriminar cuáles son las microondas que vienen del cuerpo que se está analizando y cuáles son señales interferentes, provenientes de teléfonos móviles, el ambiente o la propia señal Wifi.

## MUTANT

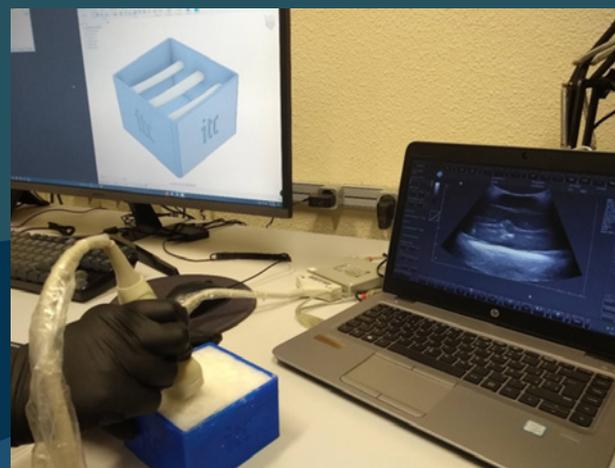
A través de los receptores de microondas desarrollados para el sistema PROMISSE podemos obtener medidas puntuales de la radiación natural de los tejidos en profundidad. Para calibrar el sistema tanto en profundidad como en temperatura se requiere el uso de fantasmas. Estos nos permiten realizar pruebas experimentales a nivel de laboratorio previas al ensayo clínico. Además, en el desarrollo de los fantasmas se busca dotarlos de multifuncionalidad para incrementar su aplicabilidad en el entorno médico. De esta manera surge el proyecto MUTANT (*MUltimodal Tissue phANToms*).



Prototipo PROMISSE y fantasmas. © IACTEC

“Los fantasmas son componentes creados artificialmente y, en nuestro caso, están basados en un polímero, criogel de alcohol de polivinilo (PVA-C). El proceso de fabricación es muy versátil y dependiendo de la concentración de los constituyentes del fantoma, se pueden modificar sus características y, así, simular diferentes tejidos blandos del cuerpo, como por ejemplo músculo o piel. Además, se pueden añadir otras sustancias comunes de bajo coste, como puede ser la celulosa, de forma que la utilidad de los fantasmas puede extenderse de las aplicaciones de microondas a otras técnicas de imagen de diagnóstico médico como puede ser el ultrasonido”, señala Arteaga.

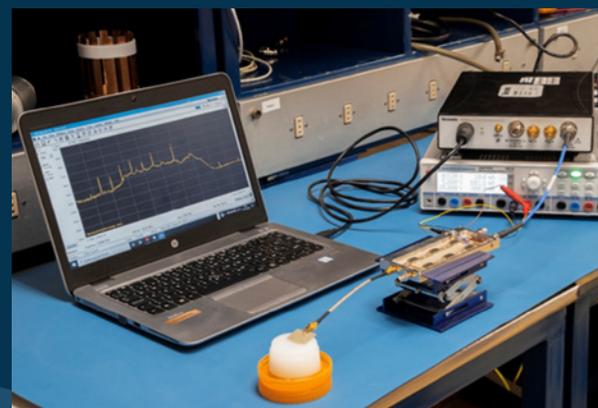
“Por otra parte, se está desarrollando un modelo antropomórfico de pie cuya carcasa externa está compuesta por una resina flexible. En su interior se



Proyecto MUTANT. © IACTEC

incorporará un circuito electrónico compuesto por 23 regiones distribuidas por la planta del pie, que pueden activarse de forma independiente, para producir un calentamiento de la superficie del modelo y simular patrones de temperatura típicos de las patologías del pie diabético, así como de sujetos sanos”, comenta **Jordan Ortega**, ingeniero de Inteligencia Artificial del programa de Tecnología Médica de IACTEC.

“Las imágenes adquiridas usando el modelo de pie y el sistema de adquisición desarrollado, PINRELL, serán empleadas para tareas de calibración de los prototipos, así como para automatizar y perfeccionar los algoritmos que se utilizarán en el pre- y post-procesamiento de imagen basados en técnicas de aprendizaje automático (*Machine Learning*) y aprendizaje profundo (*Deep Learning*). Los algoritmos desarrollados permiten, entre otras aplicaciones, seleccionar únicamente la planta de los pies en las imágenes adquiridas, la comparación



MUTANT combinado con PROMISSE. © IACTEC

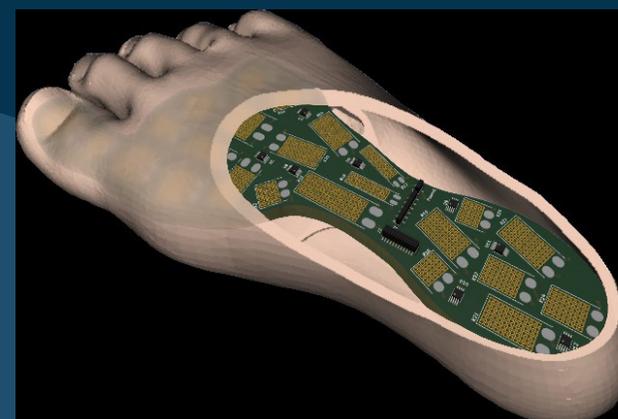
en el tiempo de las imágenes correspondiente al mismo sujeto, así como la clasificación entre sujetos sanos y patológicos a partir de las imágenes infrarrojas. De esta forma, a partir de una única imagen y de forma automática, mediante la detección se podrán señalar regiones susceptibles de desarrollar una patología del pie diabético y, mediante la clasificación correspondiente, permitirá discernir entre un pie sano y uno diabético”, explica Arteaga.

Los prototipos en desarrollo son portátiles, de bajo coste y no invasivos, por lo que no supondrían ningún tipo de peligro para el paciente, ya que sólo se mide la radiación natural emitida por el cuerpo en forma de calor.

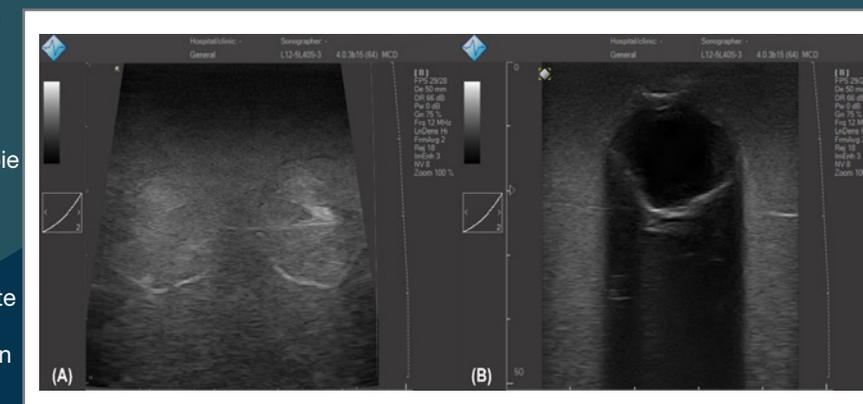
“El programa de Tecnología Médica de IACTEC tiene un impacto directo en la salud de las personas. Además, cabe destacar el impacto que tendría en el sector sanitario ya que permitiría a los médicos disponer de herramientas que ayuden a anticipar y personalizar los diagnósticos y tratamientos, así como disponer de herramientas de aprendizaje”, señala Ramos.

El programa de Tecnología Médica integrado en IACTEC cuenta con el apoyo del Cabildo de Tenerife a través del programa de Capacitación Tecnológica IACTEC, el programa de Infraestructuras Científicas del Ministerio de Ciencia e Innovación y el programa INTERREG MAC, entre otros, además de contar con la colaboración de diversas entidades públicas y privadas de investigación biomédica.

EQUIPO IACTEC. Tecnología Médica



Diseño del circuito electrónico integrado en el modelo antropomórfico de pie. © IACTEC



Imágenes de ultrasonido del fantoma pseudoantropomórfico de pulmón. © IACTEC



Regiones de activación del modelo antropomórfico de pie y su correspondiente imagen térmica. © IACTEC

#### ARTÍCULOS RECIENTES:

- Arteaga-Marrero et al. (2023). “Low-Cost Pseudo-Anthropomorphic PVA-C and Cellulose Lung Phantom for Ultrasound-Guided Interventions”. *Gels*, 9, 2, 74;
- Hernández-Guedes et al. (2023). “Feature Ranking by Variational Dropout for Classification Using Thermograms from Diabetic Foot Ulcers”. *Sensors*, 23, 2, 757;
- Villa et al. (2023). “Multifrequency Microwave Radiometry for Characterizing the Internal Temperature of Biological Tissues”. *Biosensors*, 13, 1, 25.
- Hernández-Guedes et al. (2022). “Performance Evaluation of Deep Learning Models for Image Classification Over Small Datasets: Diabetic Foot Case Study”. *IEEE Access*, 10, 124373-124386.

# El infrarrojo y la divulgación

En ocasiones damos explicaciones demasiado sencillas. Cuántas veces hemos afirmado con seguridad: “La diferencia entre las estrellas y los planetas es que las primeras brillan con luz propia, mientras que los planetas reflejan su luz”. Bueno, eso no es del todo cierto. Todo, por el simple hecho de estar a una temperatura, brilla (emite radiación electromagnética). Lo que pasa es que brilla poco o en un tipo de luz que no percibimos con nuestro sentido de la vista. Para que algo brille lo suficiente para ser visto por nuestros ojos necesitamos que supere unos 550° C de temperatura. No vemos brillar una pizza a simple vista por muy caliente que esté, pero esto es una limitación de nuestro sentido de la vista. Si nos acercamos con los ojos cerrados, aún sin tocarla, percibiremos en nuestra piel su calor, en parte debido a la radiación infrarroja que está emitiendo. Cuando vamos a la playa, disfrutamos cerrando nuestros ojos y dejando que la radiación ultravioleta e infrarroja (además de la visible) nos caliente. Si se nubla o algo nos da sombra, no necesitamos abrir los ojos para percibir este hecho.

Hablar y divulgar sobre el espectro electromagnético se ha vuelto más sencillo con el tiempo, gracias a los



Experimento con imágenes infrarrojas en las ferias de ciencia con participación del IAC © IAC

sensores bidimensionales que nos permiten “traducir” la radiación infrarroja recibida en un mapa de temperaturas, que somos capaces de ver como lo que es, una imagen “distinta” del Universo que nos rodea. De esta forma, podemos diferenciar dos botellas aparentemente iguales en el visible, pero que se encuentran a temperaturas distintas. Igualmente, podemos ver a través de materiales transparentes al infrarrojo, aunque opacos al visible, y viceversa, materiales transparentes al visible y opacos al infrarrojo. ¡Podemos ver lo invisible! y esto es algo que fascina, sobre todo, a los más jóvenes. Es por ello que una cámara infrarroja resulta una herramienta indispensable para dar a conocer toda la ciencia que se esconde en este rango del espectro electromagnético. El IAC ha utilizado cámaras infrarrojas para la divulgación desde hace más de 15 años en ferias de la ciencia, obras de teatro y actividades científicas que han atraído a todos los públicos.

Su uso, ahora frecuente, por los bomberos (que pueden ver qué oculta el humo), policía (viendo a través de paredes), científicos de todo tipo que vigilan la Tierra desde el espacio, ingenieros que buscan fallos en los sistemas o estructuras, sanitarios que estudian enfermedades específicas... hacen de este tipo de cámaras algo cada vez más común y para lo que se encuentran nuevas y útiles aplicaciones.

ALFRED ROSENBERG,  
astrónomo divulgador de la UC3 (IAC)

Experimento en el Museo de la Ciencia y el Cosmos durante la función *Sueñan los títeres con el Cosmos*. © Daniel López/IAC.



# "El fantasma de la luz"

## Módulo del Museo de la Ciencia y el Cosmos

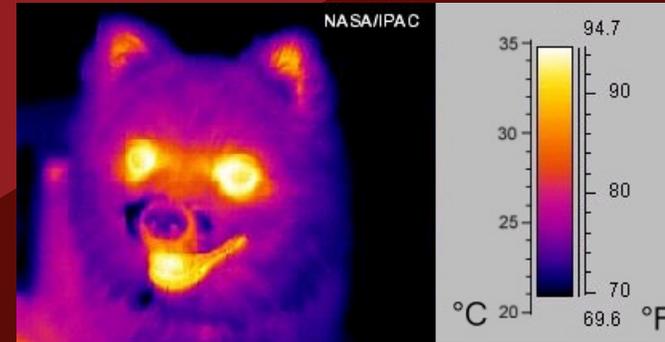


Imagen de la cabeza de un perro y escala de color y temperatura. © NASA/IPAC



Taller con alumnos en el MCC con el módulo "El fantasma de la luz" e impartido por Oswaldo González, responsable de Didáctica de este museo. © MCC/Cabildo de Tenerife

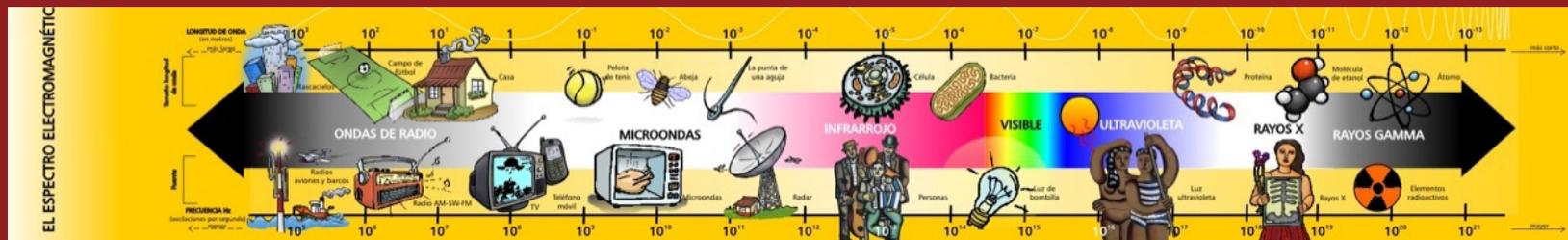
Aparte de la luz que percibimos con nuestros ojos, existen otros tipos de “luces” que no podemos ver como, por ejemplo, la luz ultravioleta, los rayos X, las ondas de radio, el infrarrojo... Aunque las conocemos con distintos nombres, todas estas otras “luces” son el mismo fenómeno físico: un tipo de ondas que llamamos radiación electromagnética.

Cuando calentamos fuertemente un hierro, podemos ver que emite una luz blanco-amarillenta. A medida que el hierro se enfría, esta luz se va volviendo más tenue y rojiza, hasta que llega un momento en que se apaga. Sin embargo, el hierro caliente sigue emitiendo luz, pero ésta tiene ya una longitud de onda (un color) que nuestros ojos son incapaces de ver. A este tipo de luz lo llamamos “infrarrojo”, porque se sitúa en el espectro por debajo del rojo. Todos los cuerpos calientes emiten luz, pero nuestros ojos sólo la perciben a partir de una cierta temperatura. Existen animales -cierto tipo de serpientes o los mosquitos-, que pueden detectar luz infrarroja.

En las dos pantallas del módulo “El fantasma de la luz”, del Museo de la Ciencia y el Cosmos (MCC), del Cabildo de Tenerife, podrás observarte tal como te verías con luz visible y con luz infrarroja. La cámara térmica “traduce” la radiación invisible infrarroja emitida por nuestros cuerpos a luz visible. En la imagen producida por la cámara infrarroja, los diferentes colores indican las diferentes temperaturas de los objetos, incluyendo tu cuerpo. Si llevas gafas, observarás que se muestran de color negro, porque el material de la lente es opaco a la radiación infrarroja de esta longitud de onda.

OSWALDO GONZÁLEZ,  
responsable de Didáctica en el MCC

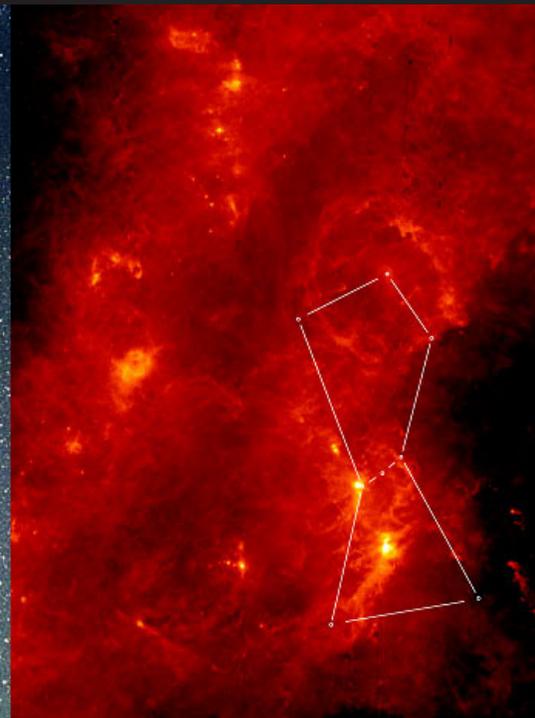
El espectro electromagnético. Diseño por © Miriam Cruz (MCC).





Arriba, a la izquierda, galaxia M81 o galaxia de Bode en el rango visible, imagen obtenida con el telescopio IAC-80, en el Observatorio del Teide. © Daniel López/IAC  
 A la derecha, la misma galaxia en el rango infrarrojo cercano, obtenida con el satélite Spitzer. © NASA/JPL-Caltech/K. Gordon (University of Arizona) & S. Willner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)  
 Abajo, a la derecha, la constelación de Orión en el visible. © Hideo Fukushima, National Astronomical Observatory Japan  
 A la izquierda, la misma constelación en el infrarrojo. © AKARI, JAXA

En la siguiente página, la nebulosa Cabeza de Caballo, obtenida con el Hubble © NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

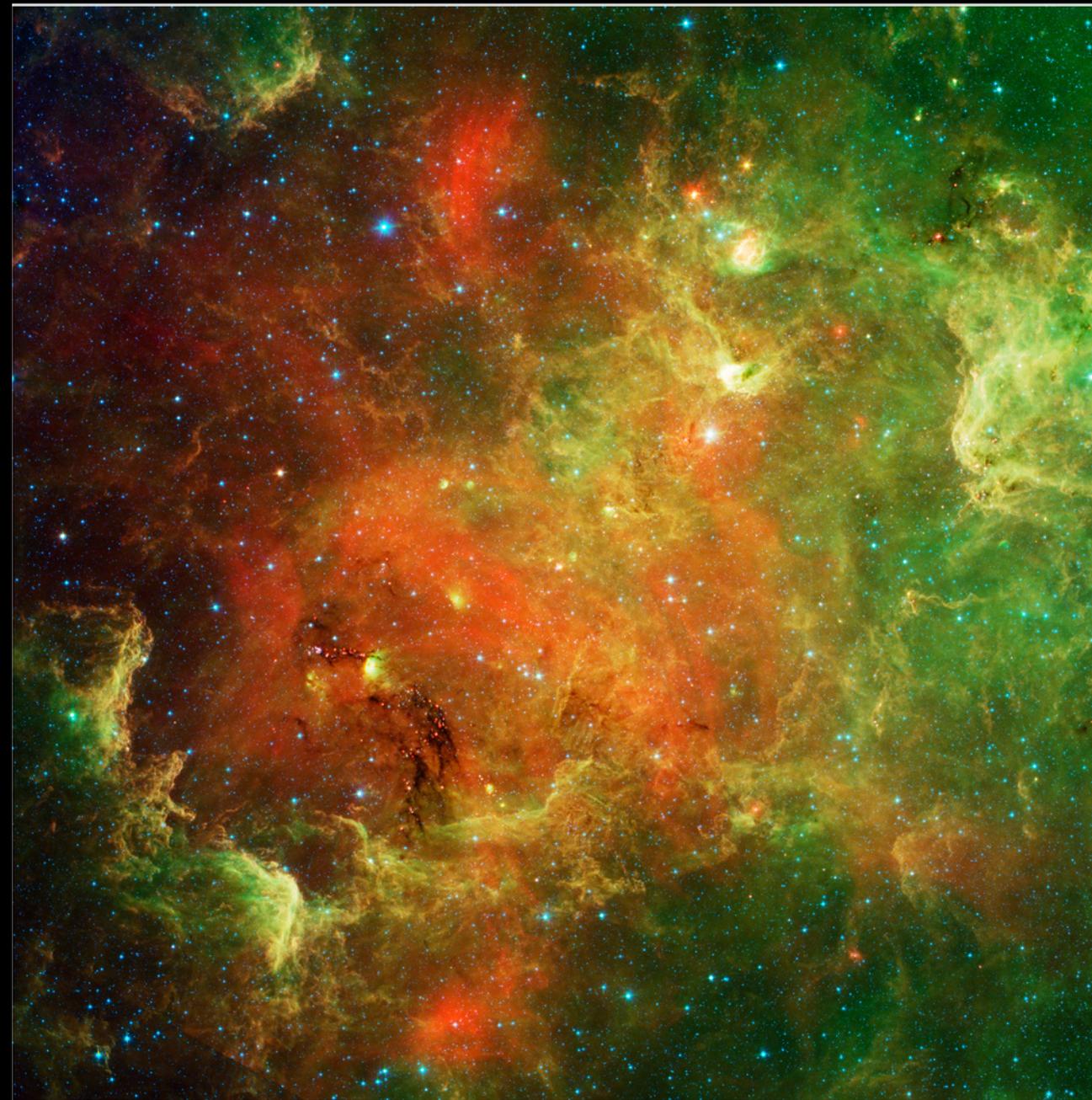


Visible Light (DSS/D. De Martin)



North America Nebula Comparison  
NASA / JPL-Caltech / L. Rebull (SSC/Caltech)

Infrared Light



Spitzer Space Telescope • IRAC • MIPS  
ssc2011-03b



EXCELENCIA  
SEVERO  
OCHOA



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE CIENCIA  
E INNOVACIÓN