

SEA
Sociedad Española de Astronomía



Portada: Imagen de Sagittarius A* obtenida por el Telescopio Horizonte de Sucesos (EHT).
Créditos: Colaboración EHT.

Comité editorial:

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

Maquetación:

Fernando J. Ballesteros Roselló

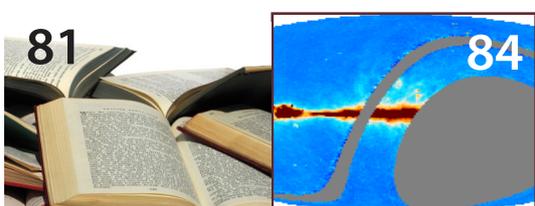
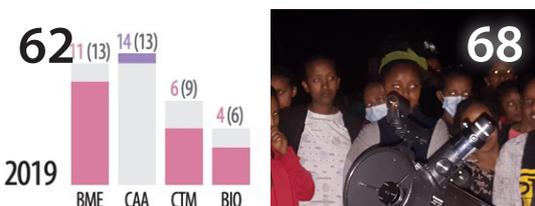
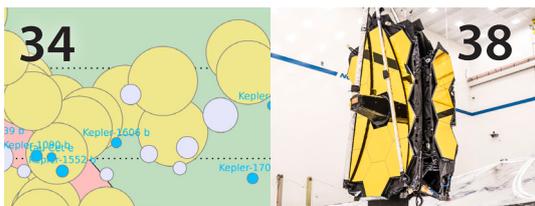
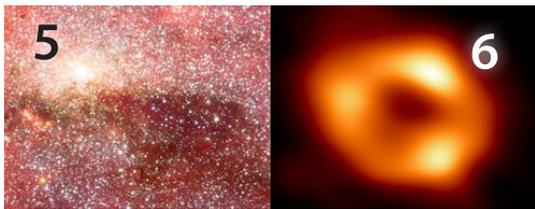
Sociedad Española de Astronomía SEA

www.sea-astronomia.es

Comisión de Información

comi-info@sea.am.ub.es

CONTENIDOS



- 5 Editorial
- 6 Fotografiando SgrA* con el EHT
- 10 Oscilaciones de un monstruo magnético en NGC 253
- 18 RS Ophiuchi: aceleración hadrónica en la primera nova de muy altas energías
- 24 Earendel. Una estrella a redshift 6.2
- 28 Descubrimiento de un centenar de planetas vagando por nuestra galaxia
- 34 Exoplanetas
- 38 Webb: El Futuro de la Astronomía Infrarroja a nuestro alcance
- 48 MAAT, la nueva unidad de campo integral de OSIRIS en el GTC
- 58 EAGLE: simulaciones cosmológicas para entender el Universo
- 62 AYA en la Agencia Estatal de Investigación
- 68 La Red Africana de Mujeres en Astronomía
- 74 AstrónomAs: un viaje a través del Universo de la mano de centenares de mujeres
- 80 Ecos de (la) Sociedad
- 81 Libros
- 84 Tesis doctorales

Zoom al centro de la Vía Láctea, un lugar lleno de gas y polvo, que hace muy difícil obtener una imagen directa del agujero negro central.
Crédito: NASA/JPL-Caltech



EDITORIAL

Abrimos este nuevo número del boletín con la hazaña científica de conseguir la primera imagen de nuestro “pequeño” monstruo SgrA*. Las observaciones con el Telescopio Horizonte de Sucesos (EHT) ya marcaron un hito en 2019 al conseguir la primera imagen de un agujero negro, en este caso en M87. Nuestro compañero José Luis Gómez nos cuenta algunos detalles sobre los últimos resultados.

De monstruo a monstruo: después de hablar de las dificultades técnicas para alcanzar la resolución y sensibilidad necesaria para detectar el horizonte de sucesos de un agujero negro, nos asomaremos a un monstruo magnético que es capaz de saturar casi cualquier detector en pocos segundos. Un equipo liderado por Alberto J. Castro-Tirado ha conseguido por primera vez caracterizar la estructura temporal de la fase de explosión temporal de un magnetar. Y Alicia López Oramas nos desvela las claves detrás de la primera detección de una Nova en rayos gamma de muy alta energía con los telescopios Cherenkov MAGIC. Esto es sin duda un gran ejemplo de los grandes descubrimientos que la nueva generación de telescopios Cherenkov nos traerán en un futuro cercano.

En este boletín también se hace la presentación en (la) sociedad de Earendel, la estrella más lejana conocida y cuya detección ha sido posible gracias al efecto de lente gravitatoria. José María Diego y su equipo nos comentan los entresijos de esta nueva detección. Y de las estrellas saltamos al estudio de exoplanetas, Núria Miret nos cuenta su búsqueda de planetas errantes. Enric Pallé nos hace una revisión del estado actual del estudio de exoplanetas y qué podemos esperar en un futuro próximo gracias a la nueva instrumentación.

En la sección de instrumentación, Macarena García Marín y sus colaboradores nos hablan de JWST, habiendo ya llegado a su órbita se está trabajando en la puesta a punto y verificación de la instrumentación a bordo. Por otro lado, se está diseñando una unidad de campo integral para OSIRIS en GTC llamado MAAT. El investigador principal de MAAT, Francisco Prada, junto a su equipo nos traen un interesante artículo sobre sus características técnicas y aplicaciones. Por último en esta sección, pasamos a hablar de simulaciones cosmológicas y cómo EAGLE nos ha ayudado a comprender mejor la formación y evolución de galaxias de la mano de Claudio Dalla Vecchia.

Y para hacer realidad todo este fantástico trabajo técnico y de investigación, no nos queda otra que lidiar con la política científica. Inmaculada Domínguez y Patricia Sánchez como coordinadora y gestora del área temática de gestión de Astronomía y Astrofísica del ministerio nos acercan su visión sobre el estado actual, así como sus fortalezas y debilidades. Por último, dos artículos muy interesantes sobre la red africana de mujeres en astronomía liderado por Mirjana Povic, y la exposición virtual AstrónomAs presentada por Josefina F. Ling y colaboradores.

¡Feliz solsticio!

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

FOTOGRAFIANDO SgrA* CON EL EHT

El 10 de abril de 2019 la colaboración del Telescopio Horizonte de Sucesos (EHT por sus siglas en inglés) revelaba la primera imagen de un agujero negro, el situado en el corazón de la galaxia M87. Más recientemente, el EHT ha conseguido obtener la primera imagen directa del agujero negro en el centro de nuestra galaxia, conocido como SgrA*, mostrada en la Fig. 1. Con estas imágenes los agujeros negros han pasado de ser una solución a las ecuaciones de la Relatividad General, a ser objetos reales que podemos estudiar a través de repetidas observaciones astronómicas.



José Luís Gómez
Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC
jlgoomez@iaa.es

Los agujeros negros son a la vez los objetos más exóticos y simples que predice la teoría de la relatividad de Einstein. En ellos la curvatura del espacio-tiempo es tan intensa que llegan a producir un “agujero” en el propio Universo. Este “agujero”, o singularidad, está rodeado por el horizonte de sucesos, de donde ni siquiera la luz puede escapar, lo que convierte a los agujeros negros en objetos teóricamente “invisibles”, o negros. El horizonte de sucesos es por tanto una puerta de salida sin retorno de nuestro universo. Nada impide que crucemos el horizonte de sucesos, pero no podríamos volver para contar lo que hemos visto. Fotografiar agujeros negros es por tanto una labor complicada, ya que solo podemos distinguir su silueta delineada por el anillo de luz aumentado, correspondiente a la última órbita inestable de los fotones alrededor del horizonte de sucesos.

El tamaño de un agujero negro es proporcional a su masa, y por tanto el tamaño aparente en el cielo viene dado por la razón entre su masa y la distancia a la que se encuentra. Aunque los agujeros negros en M87* y SgrA* son super masivos, con masas 6.5 miles de millones de veces mayor que la del Sol en M87* y 4 millones de veces mayor en SgrA*, el tamaño aparente de estos agujeros negros en el cielo es tan solo de unos 40 y 50 microsegundos de arco, respectivamente, lo que equivale al tamaño de una rosquilla en la Luna. Fotografiar estos agujeros negros requiere un telescopio con una resolución angular sin precedentes en Astronomía, del orden de unos 20 microsegundos de arco o menor. Además es necesario observar a una longitud de onda lo suficientemente corta como para que la emisión que rodea al horizonte de sucesos sea ópticamente delgada.

Necesitamos por tanto un telescopio tan grande como la Tierra para alcanzar esta resolución angular, algo que solo es factible obtener gracias a la técnica de interferometría de muy larga base (VLBI por sus siglas en inglés). El EHT es un conjunto de antenas repartidas por toda la superficie terrestre operando a longitudes de onda milimétricas. Gracias a la técnica de VLBI, el EHT es capaz de sintetizar un telescopio virtual tan grande como toda la Tierra, con lo que es posible alcanzar resoluciones angulares del orden de unos 20

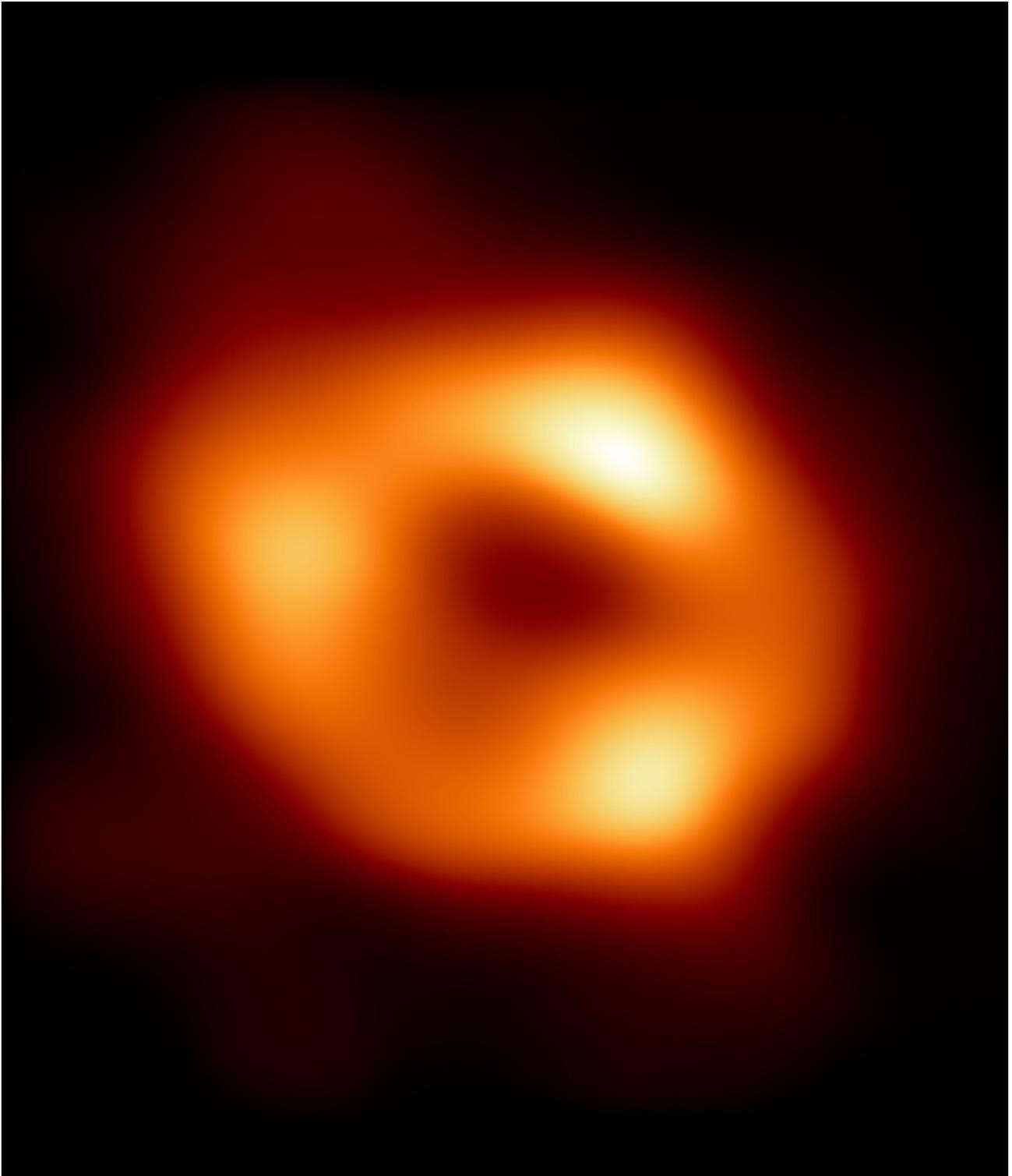


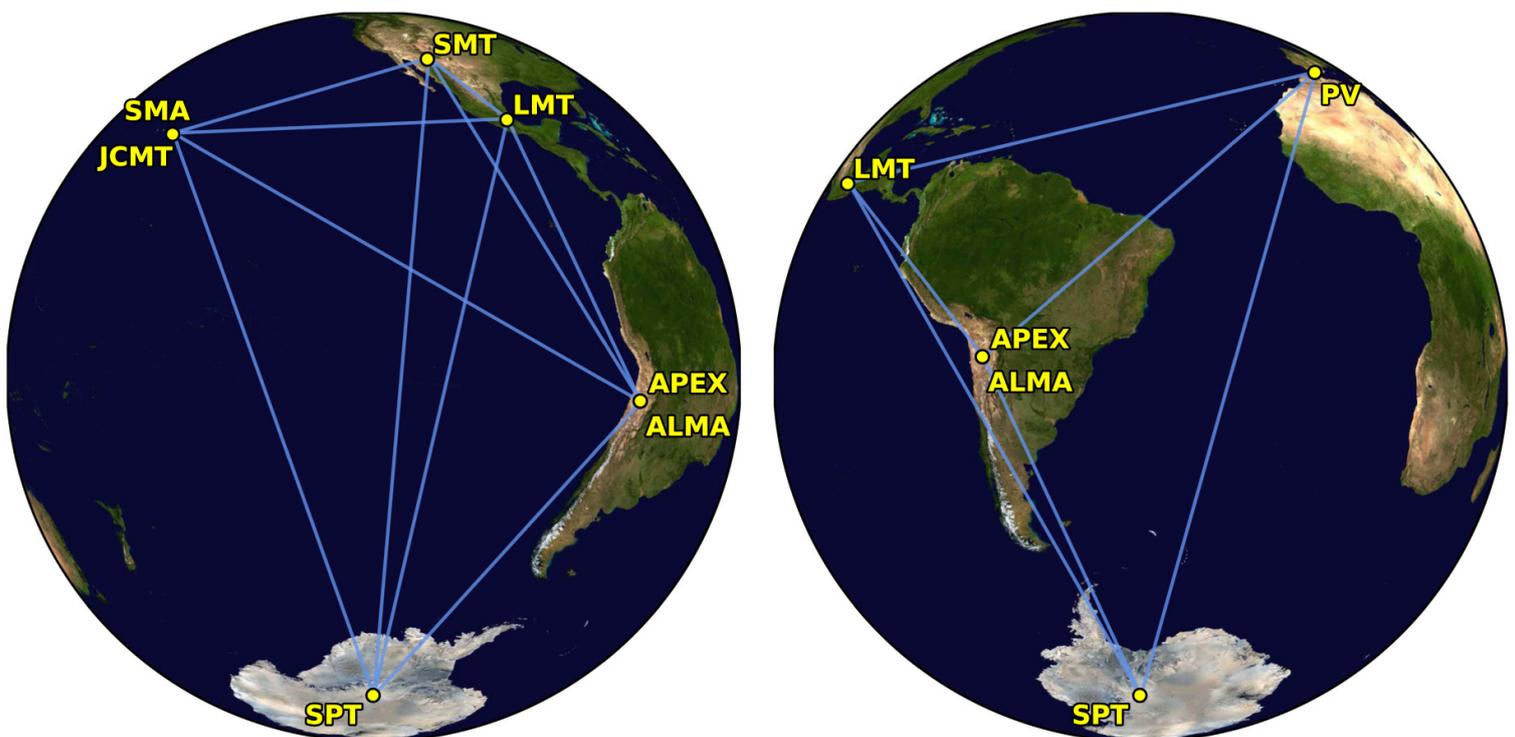
Figura 1. Primera imagen de SgrA*, el agujero negro super masivo en el centro de nuestra galaxia, obtenida con el Telescopio Horizonte de Sucesos. Reproducida de The Event Horizon Telescope Collaboration et al. 2022, ApJL, 930, L14. Esta es la primera evidencia visual de la existencia de este agujero negro.

microsegundos de arco. Las observaciones del EHT suponen la culminación de años de desarrollo instrumental por parte de numerosas instituciones repartidas por todo el mundo que engloba a los más de 300 investigadores que forman la colaboración del EHT.

El EHT no funciona como los otros telescopios. Cada par de antenas que forman el EHT proporciona un patrón de interferencia, o un valor de las visibilidades. La imagen final del interferómetro corresponde a la transformada de Fourier de las visibilidades obtenidas. Telescopios relativa-

mente cercanos muestrean las bajas frecuencias espaciales, mientras que telescopios separados por grandes distancias proporcionan las altas frecuencias espaciales que nos permiten distinguir los detalles más finos en la imagen. A medida que la tierra rota, la separación y la orientación entre los telescopios cambia, proporcionando información extra. Observando durante toda una noche, los ocho radio telescopios que forman el EHT acumulan la información suficiente para obtener una imagen, haciendo del EHT el único instrumento que tenemos capaz de fotografiar agujeros negros super masivos, como SgrA* o M87*.

Figura 2. El conjunto de radio telescopios de EHT 2017 constituido para la observación de Sgr A*. El conjunto incluía ocho observatorios en seis ubicaciones: el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) y el Atacama Pathfinder Experiment (APEX) en el Llano de Chajnantor en Chile, el Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano (LMT) en el Volcán Sierra Negra en México, el Telescopio James Clerk Maxwell (JCMT) y el Submillimeter Array (SMA) en Maunakea en Hawái, el telescopio de 30 m del Institut de Radioastronomie Millimétrique (PV) en Pico Veleta en España, el Telescopio Submilimétrico (SMT) en Mt. Graham en Arizona y el Telescopio del Polo Sur (SPT) en la Antártida. Créditos: The Event Horizon Telescope Collaboration et al. 2022, ApJL, 930, L12.



Sin embargo, obtener la imagen del agujero negro en SgrA* ha sido significativamente más complicado de lo que fue para M87*. La razón principal es que el tamaño del agujero negro en SgrA* es mucho menor que en M87*. El horizonte de sucesos de un agujero negro se ve delimitado por el plasma que gira a su alrededor a una velocidad cercana a la de la luz. Pero mientras que en M87 tarda días o semanas en completar una órbita, en el caso de SgrA*, más de mil veces más pequeño, tarda tan solo unos minutos en girar alrededor del agujero negro. Por tanto, mientras el EHT estaba tomando datos durante toda una noche la imagen del agujero negro en SgrA* cambiaba en tan solo minutos. Fotografiar SgrA* con el EHT es como intentar hacerle una foto de noche a un niño corriendo, mientras que fotografiar M87* se parece más a hacerle una foto de día a un adulto que posa para la imagen.

Años de estudio nos han permitido diseñar nuevos algoritmos capaces de contrarrestar el movimiento rápido del gas alrededor de SgrA*. El análisis de los datos de SgrA*, y el estudio de millones de imágenes de agujeros negros generadas con simulaciones magnetohidrodinámicas relativistas (GRMHD, por sus siglas en inglés), nos ha permitido establecer cuál es el efecto concreto de esta variabilidad en los datos obtenidos con el EHT. En particular, cómo esperamos que varíen las visibilidades obtenidas en función de la distancia que separa a cada par de telescopios, y englobar esta variabilidad como un término extra de error en los datos.

Hemos realizado literalmente decenas de millones de imágenes con datos simulados para refinar nuestros algoritmos de reconstrucción de imágenes interferométricas, así como el modelo de variabilidad de SgrA*. Una vez estaba todo listo, hemos hecho miles de imágenes de SgrA* con los mismos parámetros que nos han permitido reproducir los datos simulados.

Cada una de estas imágenes es ligeramente distinta, pero la inmensa mayoría muestra el anillo de luz característico de un agujero negro con ligeras variaciones en la distribución de brillo a lo largo del mismo. La imagen final (Fig. 1) es un promedio de estas imágenes, revelando el gigante que se encuentra en el centro de nuestra galaxia.

Según la Teoría de la Relatividad de Einstein, el tamaño que vemos del agujero negro viene dado únicamente por su masa, y en mucha menor medida por cómo de rápido rota (su spin). Estudios previos, merecedores del Premio Nobel de Física en 2020, nos han permitido determinar con una gran precisión la masa de SgrA*, por lo que sabíamos muy bien (mucho mejor que para M87*) qué tamaño debía tener SgrA*. El anillo de luz en la imagen del EHT tiene un tamaño de exactamente 52 microsegundos de arco, en perfecta concordancia con la Teoría de la Relatividad. SgrA* tiene un tamaño unas mill veces menor que M87, y aún así los dos agujeros negros son exactamente iguales, y solo cambia su tamaño. Por primera vez confirmamos esta propiedad fundamental de la Teoría de la Relatividad.

La comparación de la imagen de SgrA* con millones de modelos GRMHD, así como con observaciones a otras longitudes de onda nos han permitido acotar también algunas de las propiedades del agujero negro en el centro de nuestra galaxia. Nuestras observaciones sugieren que estamos viendo el agujero negro con una inclinación menor de unos 50 grados; es decir, el spin de SgrA* no es perpendicular al plano galáctico. Además nuestras observaciones favorecen modelos en los que el agujero negro rota rápidamente, con un disco de acrecimiento que rota en el mismo sentido y cuya dinámica está dominada por campos magnéticos intensos.

Con las primeras imágenes de los agujeros negros en M87* y SgrA* el EHT ha demostrado que es posible estudiar estos objetos con repetidas observaciones astronómicas, comenzando una nueva era en el estudio de los agujeros negros. El EHT se encuentra en continua expansión. Tres nuevas antenas se han añadido al EHT desde estas primeras observaciones en 2017. Observaciones a longitudes de onda incluso menores nos permitirán mejorar aún más la resolución angular para obtener imágenes más nítidas y poner a prueba la teoría de la relatividad con tests cada vez más precisos. Observaciones continuadas de M87* nos permitirán realizar las primeras películas de agujeros negros para entender cómo es posible extraer energía de los agujeros negros y formar los gigantes jets que emanan de sus cercanías y se extienden más allá del tamaño de la galaxia que los contienen, como ocurre en M87*.

OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO

Los magnetares son estrellas de neutrones aisladas y fuertemente magnetizadas (hasta $B \sim 10^{15}$ G), con luminosidades $L_x \sim 10^{31} - 10^{36}$ erg s^{-1} y periodos de rotación en el rango de 0,3–12 s. Fulguraciones muy energéticas de magnetares galácticos (alcanzando picos de luminosidad de $10^{44} - 10^{47}$ erg s^{-1} y durando $\sim 0,1$ s) habían sido detectadas hasta la fecha en rayos-X y rayos-gamma suaves. Ahora, por vez primera, hemos observado los momentos iniciales de una fulguración muy energética ($\sim 10^{46}$ erg s^{-1}) durante los 0,2 s en los cuales rayos-gamma fueron detectados. En esa fase hemos registrado oscilaciones de muy altas frecuencias que revelan nuevas propiedades de estos eventos tan violentos.

Alberto J. Castro-Tirado

Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC
@AJCastroTirado

M^a. Carmen Sánchez-Gil

Dpt. de Estad. e Invest. Operativa, U. de Cádiz

Javier Pascual-Granado

Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC

Michael Gabler

Dpt. Astron. y Astrofísica, U. de Valencia

Víctor Reglero Velasco

IPL / Dpt. Astron. y Astrofísica, U. de Valencia

Entre las estrellas de neutrones, objetos que pueden contener medio millón de veces la masa de la Tierra en un diámetro de unos veinte kilómetros, destaca un pequeño grupo con el campo magnético más intenso conocido: los magnetares.

A diferencia de las estrellas de neutrones ordinarias, los magnetares tienen campos magnéticos 10^3 veces más potentes, alcanzando 10^{10} to 10^{11} Tesla (o 10^{14-15} Gauss). Para entender esta magnitud, la intensidad del campo magnético terrestre oscila entre 25.000 – 65.000 nT (0,25 – 0,65 G), siendo el valor promedio del campo magnético del Sol de 1 G, mientras que en el imán de los frigoríficos de nuestros domicilios se eleva a 100 G.

Volviendo a los magnetares, sólo apenas conocemos treinta de ellos en nuestra Vía Láctea. Sufren violentas erupciones aún poco conocidas debido a su carácter inesperado y a su corta duración, generalmente de apenas décimas de segundo.

Y sólo en unos pocos de ellos, se han detectado fulguraciones gigantes en las cuales se han podido observar oscilaciones cuasi-periódicas (QPOs) con frecuencias tanto bajas (< 150 Hz) como altas (> 500 Hz). Pero esas QPOs nunca habían sido detectadas antes en la fase impulsiva inicial (la que comprende desde el inicio hasta alcanzar el máximo de emisión).

EL INSTRUMENTO ASIM A BORDO DE LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

El pasado 15 de abril de 2020 a las 08:48:05 UT (en pleno confinamiento por la pandemia) llegó hasta la Tierra una nueva fulguración gigante, inicialmente denominada GRB 200415, al asemejarse observacionalmente a un GRB (*Gamma-ray Burst*), y que se registró con el instrumento ASIM (*Atmosphere-Space Interaction Monitor*) a bordo de la *Estación Espacial Internacional* (ISS, Figura 1).

Con el módulo MXGS de ASIM, se obtuvieron datos durante 2 s centrados alrededor del inicio de la ráfaga [± 1 s]. MXGS está conformado por dos detectores independientes, que cubren rangos de energías complementarios: LED (el de baja energía, 50-400 keV) y HED (el de alta energía, 300 keV- 40 MeV). Ninguno de los dos llegó a saturarse. De hecho, ASIM fue el único de un total de siete instrumentos embarcados en otros tantos satélites, capaz de registrar la fase principal de la erupción en su rango completo de energía sin verse afectado por los efectos de la saturación. En virtud de ello se pudo registrar por primera vez en



Figura 1. ASIM (apuntando a la atmósfera terrestre) en el centro de la imagen, adosado al módulo COLUMBUS de la Agencia Espacial Europea (ESA) de la *Estación Espacial Internacional*. Cortesía ESA.

este rango la estructura temporal fina de la fase de explosión principal (0,8-3,2 ms) de un magnetar.

ASIM fue diseñado para observar destellos de rayos gamma terrestres de muy corta y alta intensidad, los llamados TGF (*Terrestrial Gamma-ray Flashes*), producidos por tormentas eléctricas en la alta atmósfera terrestre. Estos son destellos de unos pocos cientos de fotones en un intervalo de entre 50 a 100 μs . Por lo tanto, ASIM necesitaba tener un área de detección grande [1.000 cm^2] y una electrónica de lectura rápida [μs]. En comparación con los TGF, la fulguración gigante del evento aquí reportado es un fenómeno lento, y es por eso que el instrumento no se saturó durante la fase más intensa del estallido de la llamarada gigante.

Así pues, el equipo de más de 40 científicos y tecnólogos entre los que nos encontramos los 5 firmantes de este artículo, pudo resolver la estructura temporal del evento, una tarea verdaderamente compleja que implicó más de un año de análisis para tan sólo un segundo de datos. Gracias a la gran área colectora de ASIM, su altísima resolución temporal (hasta 1 μs) y el amplio rango de energías abarcado (50 keV a 40

MeV), pudimos realizar en detalle tanto un análisis temporal como espectral de las fases principales observadas en dicha fulguración.

Así, por primera vez, pudimos resolver la compleja estructura temporal anterior al máximo de emisión, y constatar que en este caso, la conformaban seis picos de intensidad bien diferenciados durante los primeros 3,2 ms (Figura 2) durante la fase de rápido crecimiento de la emisión, siendo este magnetar el primero en el que se ha visto la estructura fina antes del máximo.

¿A QUÉ DISTANCIA SE PRODUJO LA FULGURACIÓN?

Aunque ASIM no pudo localizar con precisión la posición en el firmamento del evento ya que estaba fuera de su campo codificado [$\pm 70^\circ$], la detección por instrumentos en 7 satélites (algunos de ellos tan distantes de la Tierra como HEND a bordo de *Mars Odyssey* o KONUS embarcado en *Wind*) permitió ubicarlo en la bóveda celeste al trazar dos anillos en la misma y considerar la diferencia de tiempos de llegada de los frentes de onda entre HEND y KONUS por un lado y entre KONUS y GBM en *Fermi* por otro,

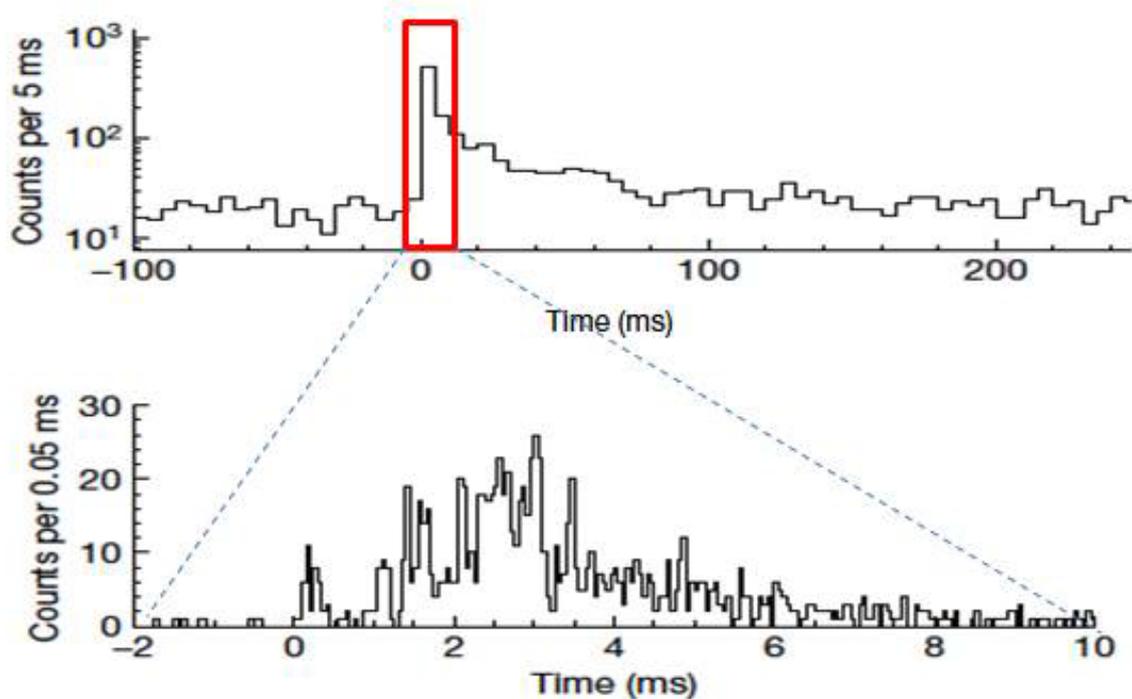


Figura 2. La curva de luz obtenida por ASIM en dos escalas temporales diferentes, mostrando debajo la altísima resolución temporal y la compleja estructura en la fase de rápida subida al máximo de la emisión. Cortesía: Universidad de València.

estando este último a 550 km de la Tierra, de manera que, se pudo localizar de una manera muy precisa y así determinar sin lugar a duda que la fulguración se originó en la galaxia NGC 253 de la constelación del Escultor, a 12,9 millones de años luz (Figura 3).

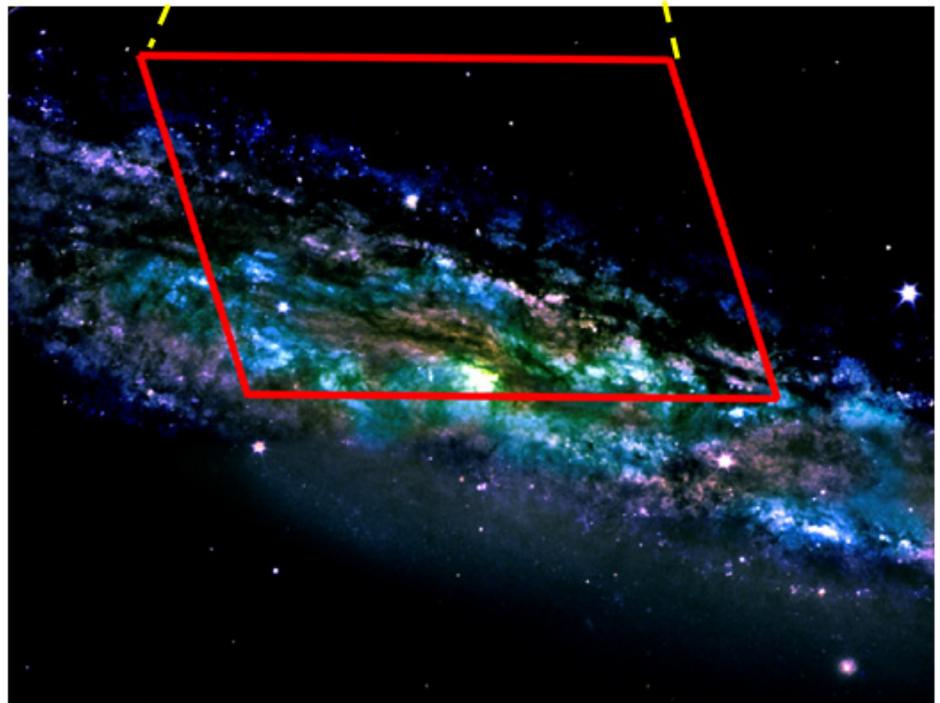
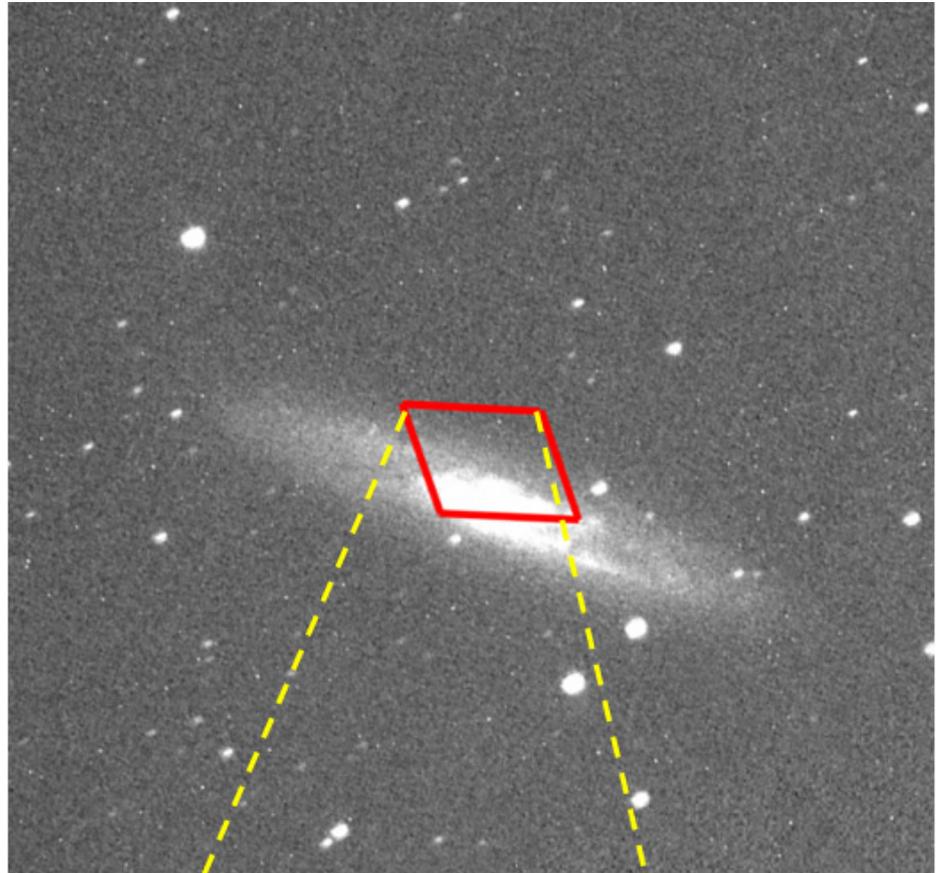
Durante los ~ 160 ms en los cuales se siguió detectando emisión de alta energía, ya sabiendo la distancia, podemos determinar la liberación de una energía que aconteció en ese brevísimo intervalo de tiempo: $\sim 10^{46}$ erg, y que correspondería aproximadamente con la energía que el Sol irradia en ~ 100.000 años.

POR PRIMERA VEZ EN MAGNETARES, QPOs DE MUY ALTA FRECUENCIA ANTES DEL MÁXIMO

Con idea de analizar concienzudamente los datos, y con la esperanza de “cazar” las QPOs en la señal, creamos curvas de luz individuales con una resolución temporal de 50 μ s cada una para los datos LED y HED, con cuatro ventanas de búsqueda diferentes;

0-5 ms, 0-10 ms, 0-50 ms y 0-100 ms. La densidad espectral de potencia (PSD) resultante alcanzaba una frecuencia de Nyquist de 10^4 Hz, que era lo suficientemente alta como para incluir las escalas de tiempo dinámicas más cortas para una estrella de neutrones típica. La PSD usando los datos LED reveló dos QPOs significativas centradas en sendas frecuencias: 2.156 ± 150 Hz y 4.256 ± 323 Hz (probablemente el primer armónico de la anterior), y que eran visibles exclusivamente durante los primeros milisegundos, que incluyen la fase más intensa de la fulguración (0,8-3,2 ms) y desapareciendo sólo 3,5 ms después del inicio. Esta detección de QPOs coincide también con el aumento de la emisión no térmica. La PSD construida usando los datos HED también muestra estas QPOs a 2.185 ± 52 Hz y 4.200 ± 37 Hz, consistentes con las frecuencias de los datos LED dentro de los errores. Además, el espectro de potencias en esta banda HED indica la presencia de una oscilación significativa adicional a $\sim 1.487 \pm 33$ Hz.

Figura 3. La zona de error más precisa que se ha podido determinar en donde se ubicaría el magnetar (obtenida por la Red Interplanetaria de Satélites, IPN3) y proyectada sobre las imágenes ópticas de NGC 253, a 12,9 millones de años luz, obtenidas por el telescopio de gran campo de la estación BOOTES-1 en el INTA/CEDEA (arriba) y por el GTC en el ORM (debajo). Cortesía IAA-CSIC/UMA e INTA-CEDEA.



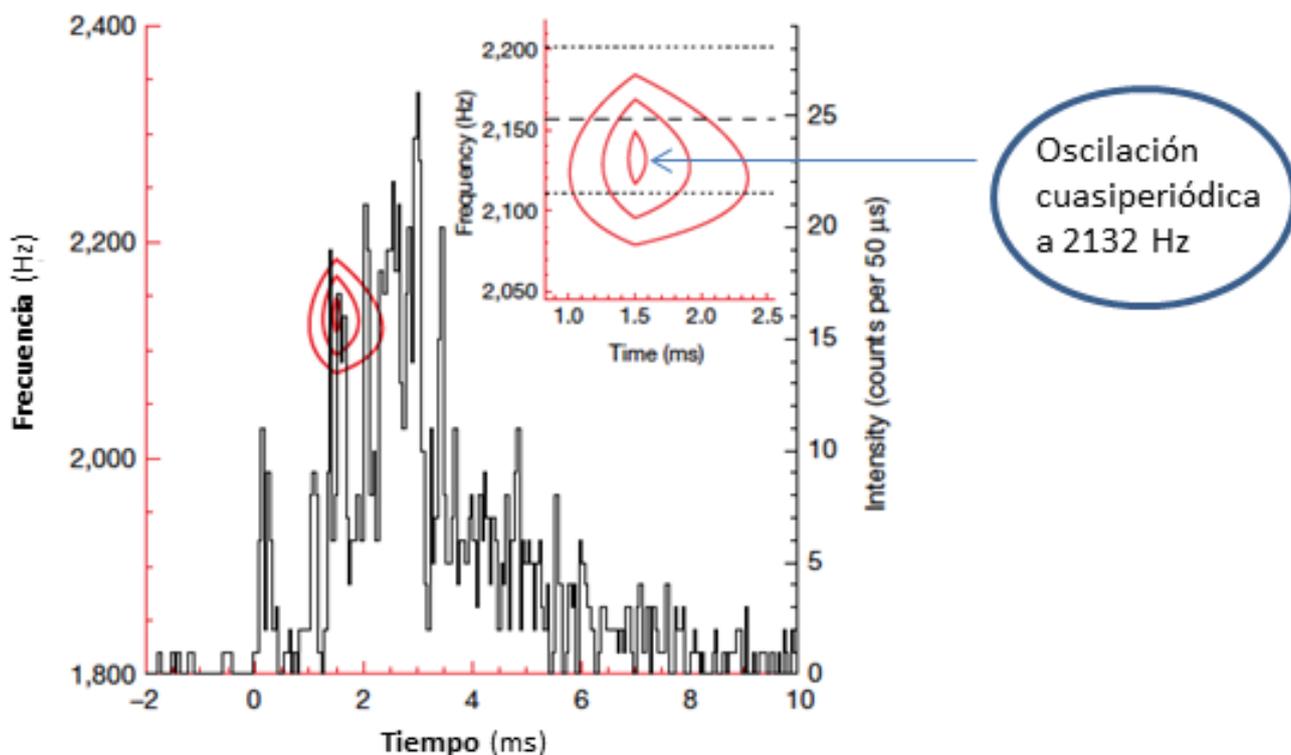


Figura 4. La detección de la oscilación cuasi periódica de muy alta frecuencia, observada por vez primera en la fase impulsiva de un magnetar gracias a ASIM. Cortesía Universidad de Cádiz e IAA-CSIC.

También hemos usado un método alternativo, empleando la estadística Z^2_m donde m es el número de armónicos sobre el que se van añadiendo las potencias de Fourier y seleccionando $m = 1$, de modo que los valores de Z^2 corresponden al doble de los potencias del test de Rayleigh. Aplicamos esta técnica de manera dinámica, considerando un intervalo de búsqueda de 5 ms en pasos de 1 ms y en el intervalo de -6 ms a 50 ms. Y en el dominio de frecuencias, se usaron 1.000 pasos en un ancho de 600 Hz centrados en los valores de las QPOs reportadas anteriormente. De este modo, para los datos de LED, se obtuvo el valor Z^2 más alto para una frecuencia $f_1 = 2.132$ Hz en el intervalo temporal de 0 a 5 ms (Figura 4), valor consistente con el obtenido por la PSD y con una probabilidad por azar de encontrar esta señal de sólo 2.4×10^{-9} . Una búsqueda a frecuencias más altas reveló otro máximo a $f_2 = 4.250$ Hz con una

probabilidad por azar de 1.7×10^{-4} en un intervalo de tiempo idéntico, lo que refuerza que esta segunda señal sea probablemente el armónico de la primera.

Finalmente, y con idea de confirmar de manera independiente estas detecciones, hemos usado los datos recogidos por el instrumento BAT, a bordo del satélite *Swift*, para confirmar la presencia de QPOs de alta frecuencia. La PSD resultante, también mostraba máximos en el rango 2.163-2.272 Hz y también en el rango 1.464-1.614 Hz, proporcionando pues una confirmación independiente de la QPO a 2.132 Hz descubierta por ASIM-LED.

Así ha quedado demostrada la detección por primera vez en magnetares, y gracias a ASIM, de oscilaciones cuasi periódicas de muy alta frecuencia durante el pico de emisión.

¿A QUÉ SE DEBE LA ALTA VARIACIÓN TEMPORAL Y LA EXISTENCIA DE QPOs?

Las variaciones en las escalas de tiempo $t \leq 0,5$ ms correspondientes a las frecuencias observadas pueden ser causadas por inestabilidades del campo magnético en la magnetosfera cerca de la superficie de la estrella de neutrones ($r \leq 100$ km). Independientemente de si consideramos un reajuste sísmico en la corteza del objeto compacto o posibles inestabilidades magnetosféricas como origen de las ondas de Alfvén (bien conocidas en el Sol) que se crean en la magnetosfera, una u otra causa es el desencadenante inicial de GRB 200415. El tiempo de cruce de Alfvén, $t_A \sim \pi r/c \sim 1$ ms, de las ondas restringidas a esta región, determina la escala de tiempo de reconexión y es la escala de tiempo típica durante la cual se desarrollan inestabilidades. Mientras rebotan entre los puntos de anclaje de sus respectivas líneas de campo magnético, siendo parte de la energía reabsorbida por la corteza, estas ondas interactúan entre sí de forma no lineal a través de diferentes líneas de campo, disipando energía. Estos 'encuentros' producen emisiones con una variabilidad típica en una escala de tiempo de 1 ms o menos, lo que es consistente con la QPO a 2.132 Hz. La segunda QPO a 4.250 Hz bien sería el sobretono (dentro de los márgenes de error) o bien podría ser producida por la interacción de múltiples ondas de Alfvén que se propagan a lo largo de líneas de campo adyacentes. Después de varios cruces, la mayor parte de la energía de las ondas habrá sido absorbida por la corteza. Se espera que la reconexión termine después de unos ms, lo que naturalmente explicaría la repentina desaparición de las QPOs.

Por último, la escala de tiempo observada de $t \sim 1/f = 0,469$ ms determina una escala de longitud en la que se libera la energía de la fulguración gigante emanada por el magnetar, $l = c \times t \sim 140$ km. Suponiendo por simplicidad una línea de campo magnético esférico, su radio sería de ~ 20 km. Por lo tanto, el volumen total de la fulguración ha sido comparable en tamaño o incluso algo mayor, que la propia estrella de neutrones.

INFORMACIÓN DERIVADA DE LOS ESPECTROS DE ALTA ENERGÍA

Las propiedades de los espectros observados son consistentes con lo que se espera que suceda durante un evento de reconexión en la magnetosfera. Primero tenemos una bola de fuego ('fireball') de

partículas en expansión, con velocidades cercanas a la de la luz, y que se forma como consecuencia de la liberación de energía durante la reconexión, con energías típicas en el rango de 20 a 80 keV, en consonancia con los 40 a 60 keV observados del espectro térmico observado. Luego tenemos la interacción de los fotones y el plasma con el intenso campo magnético. El componente no térmico estaría asociado a dispersión ciclotrón resonante de un plasma no relativista en la propia magnetosfera, altamente magnetizada y que puede aumentar la energía de los fotones emitidos térmicamente en varios órdenes de magnitud. El fuerte campo magnético también nos permite comprender la energía máxima observada ($E_{\max} \sim 1$ MeV), porque en procesos en campos magnéticos muy fuertes, como la creación de pares, la energía de los fotones se limita a aproximadamente a $E = 2 m_e c^2$ (siendo m_e la masa del electrón). Este comportamiento espectral también tiene incidencia en nuestro entendimiento de las QPOs.

'ESTRELLAMOTOS' – UNA INTERPRETACIÓN ALTERNATIVA DE LAS QPOs

Una explicación alternativa de las QPOs observadas se basaría en que las QPOs de alta frecuencia en los magnetares se interpretan comúnmente como sobretonos radiales de las oscilaciones (magneto-) elásticas fundamentales con uno o más nodos en la corteza, que se excitarán preferentemente durante la fulguración. Dependiendo de cómo se desencadene exactamente la inestabilidad en la magnetosfera, puede haber fuertes perturbaciones en la corteza de la estrella de neutrones ('estrellamotos') que naturalmente deberían provocar oscilaciones. Siguiendo esta interpretación, la segunda QPO puede estar relacionada con un sobretono aún más alto. Sin embargo, la repentina desaparición de las QPOs después de $\sim 3,5$ ms y la evolución espectral de la componente de energía favorecen ligeramente nuestro primer modelo, pero no excluyen la presencia de oscilaciones estelares.

CONCLUSIONES

Así pues, en resumen, podemos decir que fruto de este esfuerzo ha sido el registrar por vez primera dos QPOs centradas en ~ 2.132 Hz y ~ 4.250 Hz durante el episodio principal de emisión de una fulguración de rayos-gamma en la dirección de la galaxia NGC 253 en la constelación del Escultor, oscilaciones que desaparecieron tras 3.5 ms. ASIM fue el único instrumento que registró la fase principal de

la fulguración (entre 0.8 y 3.2 ms) en todo el rango de energía (50 keV–40 MeV).

Conjuntamente con las variaciones espectrales observadas por ASIM, estas QPOs de muy alta frecuencia proporcionan información adicional para entender la física de estas gigantescas fulguraciones magnéticas.

Incluso en un estado inactivo, los magnetares pueden ser cien mil veces más luminosos que nuestro Sol, pero en el caso del destello que hemos estudiado, que se produjo el 15 de abril de 2020 y que duró solo en torno a una décima de segundo, la energía que se liberó es equivalente a la energía que irradia nuestro Sol en cien mil años. Las observaciones revelaron múltiples pulsos, con un primer pulso que apareció solo alrededor de decenas de microsegundos, mucho más veloz que otros fenómenos transitorios extremos.

Se cree que las erupciones en los magnetares pueden deberse a inestabilidades en su magnetosfera o a una especie de 'estrellamotos' producidos en su corteza, una capa de carácter rígido y elástico de alrededor de un kilómetro de espesor (Figura 5).

Independientemente del desencadenante, en la magnetosfera de la estrella se crean ondas de Alfvén, y que, mientras rebotan hacia adelante y hacia atrás entre los puntos de la base de sus líneas de campo magnético, interactúan entre sí disipando energía. Así, en unos pocos milisegundos termina el proceso de reconexión magnética y, por lo tanto, también los pulsos detectados en este evento, que desaparecieron a los 3.5 ms después del estallido principal. El análisis del fenómeno ha permitido estimar que el volumen de la llamarada fue similar o incluso mayor al de la propia estrella de neutrones.

Con las frecuencias de oscilación recientemente detectadas, obtenemos información muy valiosa de cómo se comportan los magnetares, lo que hará que nuestra comprensión de estos objetos exóticos avance significativamente. Por un lado, si las frecuencias estuvieran relacionadas con sismos estelares, mejoraría nuestro conocimiento de la estructura de las estrellas de neutrones. Por otro lado, si las oscilaciones estuvieran relacionadas con procesos de reconexión magnética en la magnetosfera, aprenderíamos cómo ocurren estas erupciones gigantes.

Figura 5. Concepción artística de lo que acontecería en el magnetar de NGC 253 en el momento de la gigantesca fulguración observada el 15 de abril de 2020.
Crédito: BCSS/Mt. Visual.



La detección de oscilaciones cuasi-periódicas en este monstruo magnético ubicado en la galaxia NGC 253 ha supuesto todo un reto desde el punto de vista del análisis de señal. La dificultad radica en la brevedad de la señal, cuya amplitud decae rápidamente y queda embebida en el ruido de fondo. Y, al ser ruido correlado, resulta difícil distinguir la señal del ruido. Debemos, pues, este logro a las sofisticadas técnicas de análisis de datos que se han aplicado de manera independiente por los distintos miembros del equipo, pero también es sin lugar a dudas un logro tecnológico debido a la excelente calidad de los datos proporcionados por el instrumento ASIM a bordo de la *Estación Espacial Internacional*.

Este tipo de llamaradas se habían detectado en tres de los treinta magnetares conocidos en nuestra galaxia, la Vía Láctea, pero también en otros dos situados en otras galaxias. GRB 200415 sería la erupción en un magnetar más distante captada hasta la fecha, al hallarse en la galaxia NGC 253 sita en el grupo de galaxias Sculptor a unos 13 millones de años luz.

Terminamos añadiendo que esta erupción ha proporcionado un componente crucial para comprender cómo se producen las tensiones magnéticas dentro y

alrededor de una estrella de neutrones. El monitoreo continuo de galaxias cercanas y los magnetares de la Vía Láctea ayudará a comprender este fenómeno, y también allanará el camino para aprender más sobre las ráfagas de radio rápidas, a día de hoy uno de los fenómenos más enigmáticos de la astronomía.

AGRADECIMIENTOS

A todos los coautores del artículo publicado en 2021. En el trabajo se hacen uso de los datos de ASIM, misión de la Agencia Espacial Europea, con fuerte participación española liderada por la Universidad de Valencia y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Coautores del mismo son también investigadores de la referida universidad, y de las universidades de Cádiz y Málaga, así como del Instituto de Astrofísica de Andalucía (de donde son 7 coautores incluyendo el principal). También se han usado datos de la red de telescopios robóticos BOOTES (liderada desde el IAA-CSIC) y del Gran Telescopio Canarias.

REFERENCIA

A. J. Castro-Tirado *et al.* 2021, "Very high frequency oscillations in the main peak of a magnetar giant flare", *Nature*, 600, pp. 621-624.



De izquierda a derecha y de arriba a abajo, Alberto J. Castro-Tirado, M^a. Carmen Sánchez-Gil, Javier Pascual-Granado, Michael Gabler y Víctor Reglero Velasco. autores de este artículo.

RS OPHIUCHI: ACELERACIÓN HADRÓNICA EN

Tras más de una década intentando detectar la contrapartida más energética de los fenómenos conocidos como novas, RS Ophiuchi se ha convertido en la primera nova en ser detectada en el rango de rayos gamma de muy alta energía. Las observaciones realizadas por los telescopios MAGIC han revelado que existe aceleración hadrónica en estas explosiones termonucleares, dando lugar a la producción de rayos gamma (Acciari et al. 2022). Además, este trabajo ha aportado evidencias adicionales sobre la explicación del origen de los rayos cósmicos en la Vía Láctea.



Alicia López Oramas
Instituto de Astrofísica de Canarias
Miembro de la col. MAGIC
(@magictelesopes)
alicia.lopez@iac.es

En sistemas binarios, parte del material de una estrella puede ser interceptado por la otra. En el caso de que uno de los dos componentes sea una gigante roja, esta puede expandirse más allá de su lóbulo de Roche, lo que provocará que el material sea atraído gravitacionalmente por su compañera. Si esta estrella compañera es una enana blanca, la materia robada se irá acumulando en su superficie, lo que, eventualmente, puede provocar una explosión termonuclear, también conocida como nova (proveniente del latín *stella novae*, ya que visualmente parece que ha nacido una nueva estrella). En este caso de binarias formadas por una pareja enana blanca-gigante roja, denominaremos al sistema *nova simbiótica*. La superficie de la enana blanca se calentará, y se liberará gran cantidad de material, incrementando el brillo del sistema varios órdenes de magnitud. Estas explosiones pueden durar desde varias semanas a varios meses.

Durante estos eventos conocidos como novas, el sistema binario no se destruye, con lo cual, la transferencia de materia puede volver a restablecerse y el ciclo comenzará de nuevo. Sin embargo, muchas novas solo han sido detectadas una única vez. Se cree que muchos sistemas volverán a mostrar otro evento tras (decenas/cientos de) miles de años. Sin embargo, en la Vía Láctea conocemos al menos diez binarias que han mostrado explosiones varias veces en un mismo siglo: las llamadas *novas recurrentes*. Para que una nova simbiótica se convierta en recurrente, se cree que la masa de la enana blanca debe ser mayor de $1.1M_{\odot}$.

RAYOS GAMMA PROCEDENTES DE NOVAS

Las novas han sido ampliamente estudiadas en visible, radio y rayos X desde hace décadas. En el año 2010, el satélite *Fermi*, con su instrumento Large Area Telescope (LAT), descubrió que las novas son fuentes de rayos gamma de alta energía (por encima de 100 MeV). El primer sistema descubierto por *Fermi*-LAT fue la nova simbiótica V407 Cygni (Abdo et al. 2010). Más tarde, *Fermi*-LAT también detectaría emisión de altas energías proveniente de novas clásicas (Ackerman et al. 2014), donde la compañera es una estrella de baja masa en lugar de una gigante roja. La emisión gamma observada por *Fermi*-LAT, debida a la interacción de partículas relativistas con el material eyectado, podría tener dos orígenes: leptónico, provocado por procesos Compton inverso y radiación de frenado; o hadrónico, vía interacción protón-protón.

LA PRIMERA NOVA DE MUY ALTAS ENERGÍAS



Figura 1. Telescopios MAGIC, ubicados en el Observatorio del Roque de los Muchachos. © Giovanni Ceribella

El desarrollo de la técnica Cherenkov por imagen a finales del siglo XX y la construcción de una nueva generación de telescopios tipo Cherenkov a principios del siglo XXI, ha abierto una nueva ventana de observación del Universo: el rango de los rayos gamma de muy alta energía, con la detección de fotones de más de 100 GeV. Con esta tecnología se observan rayos gamma de muy alta energía de manera indirecta, a través de la detección de la luz Cherenkov emitida por los productos de la interacción con la atmósfera. Esto ha permitido descubrir más de 240 fuentes de muy altas energías: núcleos activos de galaxias, remanentes de supernova, sistemas binarios, estallidos de rayos gamma, pleriones... Todas ellas tienen en común ambientes extremos, donde se juntan procesos de acreción/eyección de materia y/o fuertes campos magnéticos, entre otros.

La pregunta evidente que se hizo la comunidad Cherenkov tras el descubrimiento de *Fermi-LAT* fue si las novas pueden emitir radiación de mayor energía. ¿Podría la actual generación de telescopios Cherenkov detectarlas? Claramente, en ellas existen poblaciones de partículas relativistas que producen rayos gamma a través de procesos no térmicos, con lo cual estas fuentes son buenas candidatas para emitir rayos gamma de muy alta energía.

Desde hace más de una década MAGIC (Figura 1), dos telescopios de tipo Cherenkov ubicados en el observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma), ha estado buscando emisión de muy altas energías procedente de novas (Ahnen et al. 2015). Sin embargo, la mayoría de las novas detectadas por *Fermi-LAT* muestran un corte espectral de energía en torno a

6-10 GeV, con lo cual su detección a mayores frecuencias se muestra bastante complicada. No obstante, podría ser que algún sistema exhibiera un espectro diferente o incluso podría existir una segunda componente espectral por encima de estas energías, pero la búsqueda, hasta ahora, no había dado resultados.

NOVAS: UN NUEVO TIPO DE FUENTE DE RAYOS GAMMA DE MUY ALTA ENERGÍA

RS Ophiuchi (RS Oph) es una nova simbiótica recurrente, formada por una estrella gigante roja y una enana blanca. En este caso, se cree que la enana blanca tiene una masa de entre $1.2M_{\odot}$ y $1.4M_{\odot}$, con lo que se encontraría cerca del límite de Chandrasekhar. Una vez sobrepasado este valor, el sistema colapsaría dando lugar a una supernova tipo IA.

Esta nova muestra explosiones termonucleares cada 15 años, aproximadamente. Desde su primera detección en 1898, se han observado nueve erupciones provenientes de este sistema. La última, y más relevante para nosotros, hace apenas unos meses. El 8 de agosto de 2021, a las 22:20 UT, se detecta una nueva explosión termonuclear de RS Oph, reportada en visible con una magnitud estimada 5.0 (Geary, 2021). Unas horas más tarde, a las 05:05 UT del 9 de agosto, *Fermi-LAT* descubre emisión de alta energía proveniente de esta nova (Cheung et al. 2021). Los telescopios MAGIC, dentro de su programa *Galactic Target of Opportunity*, realizan observaciones ese mismo día comenzando a las 22:27 UT. En paralelo, la colaboración H.E.S.S. también observa la fuente y anuncia al día siguiente la detección a muy altas energías (Wagner et al. 2021). [Las observaciones de MAGIC revelan la existencia de una componente de muy altas energías \(Acciari et al. 2022\)](#), contemporánea al máximo medido en visible y en altas energías. La nova se detecta con alta significancia (13.2σ) durante los primeros cuatro días, reduciendo su intensidad por debajo del umbral de detección dos semanas más tarde.

MAGIC fue capaz de medir señal proveniente de RS Oph desde el 9 al 12 de agosto de 2021, ambos inclusive, en el rango desde 60 GeV a 250 GeV. La emisión se describe como una ley de potencias (con índice espectral ~ 4.07). Analizando el espectro medido por *Fermi-LAT* contemporáneamente, observamos que la emisión conjunta *Fermi-LAT*+MAGIC puede describirse como una única componente que se expande desde 50 MeV hasta 250 GeV. Además, MAGIC es capaz de obtener

diariamente la distribución espectral de energías, lo que permite estudiar la evolución de la explosión.

El flujo medido por MAGIC parece mantenerse constante en los primeros cuatro días del evento, mientras que la componente de más bajas energías detectada por *Fermi-LAT* muestra una escala de tiempo de reducción a la mitad de flujo cada 2.2 días. Esto sugiere una migración de la emisión gamma hacia mayores energías, coincidiendo con el incremento de las energías máximas de las poblaciones de partículas.

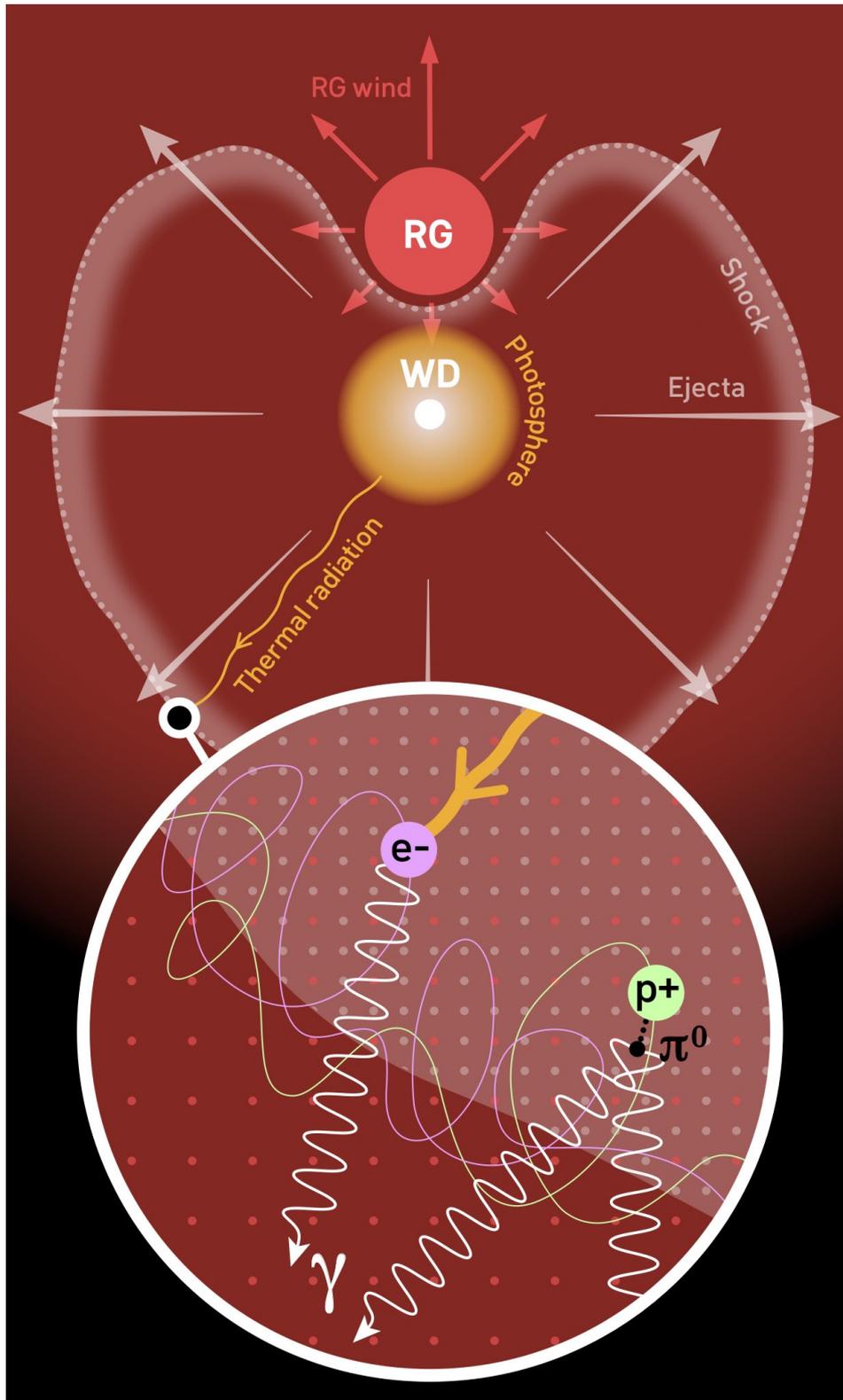
RS Oph es la nova de rayos gamma más energética y con mayor flujo medida hasta hoy, en comparación con el resto de sistemas detectados por *Fermi-LAT*. La detección a muy altas energías parece deberse simplemente a una mayor cantidad de flujo más que al hecho de tener una forma espectral más favorable frente a otros sistemas. La ausencia de detecciones previas de otras novas puede deberse a la falta de sensibilidad por parte de los detectores a dichas erupciones más débiles, sin necesidad de atribuir a RS Oph ninguna característica espectral especial.

ACELERADORES CÓSMICOS DE PROTONES

¿Cuáles son las partículas responsables de la radiación gamma medida en RS Oph? Sabemos que las condiciones en estos sistemas favorecen la aceleración de partículas, tanto electrones como protones. El material en expansión eyectado por la nova interactuará con el medio interestelar, que además se encuentra inmerso en el viento estelar proveniente de la gigante roja. Esto provocará una onda de choque. Además, la quema nuclear en la superficie de la enana blanca crea un viento rápido, que alcanzará la ya nombrada eyección y producirá, adicionalmente, un choque interno. Es en estos choques donde se producen los electrones y protones que, potencialmente, pueden producir la radiación gamma.

Como comentamos con anterioridad, la contrapartida gamma se puede producir por mecanismos leptónicos o hadrónicos (Figura 2). En el caso leptónico, la emisión de rayos gamma puede provenir de la radiación térmica de la fotosfera dispersada a mayores energías por electrones relativistas a través de proceso Compton inverso. La materia ambiente, es decir, el material eyectado y el viento estelar de la gigante roja, pueden actuar como blanco tanto en el caso de radiación de frenado por electrones o en interacciones hadrónicas de protones.

Figura 2. Esquema de la nova simbiótica recurrente RS Ophiuchi. La materia procedente de la gigante roja (RG) y capturada por la enana blanca (WD) genera una explosión termonuclear en la superficie de esta última. El material eyectado crea una onda de choque donde se aceleran partículas que producen la radiación gamma. © G. Pérez/IAC, 2022, Acciari, V. A. et al.



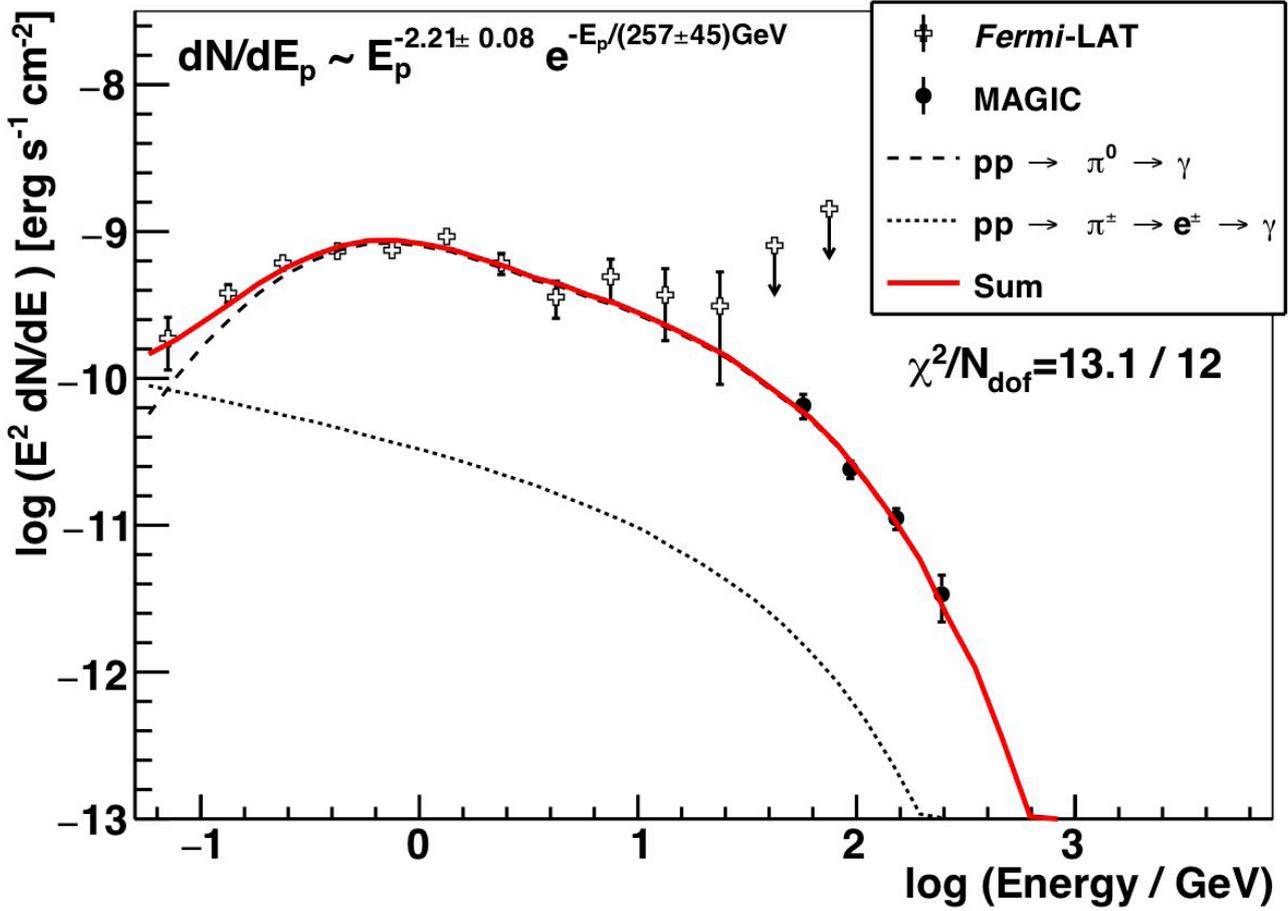


Figura 3. Las observaciones de MAGIC (puntos) y Fermi-LAT (cruces) se ajustan a un modelo hádrónico (línea roja). © 2022, Acciari, V. A. et al.

Para realizar el modelado de la emisión gamma, utilizamos los parámetros fotosféricos y la velocidad de expansión del shock que medimos simultáneamente en visible, e inyectamos poblaciones de electrones o protones.

Estudiando el espectro de RS Oph, tanto el medido diariamente como el promedio, obtenemos que el escenario que mejor describe la emisión gamma es el hadrónico (Figura 3). La radiación gamma medida conjuntamente por *Fermi-LAT* y *MAGIC* se describe como una ley de potencias ($\Gamma = -2$) con un corte exponencial, que se corresponde con la energía máxima alcanzada por las partículas en su aceleración. Una población de protones se ajusta más naturalmente a este tipo de espectro. Además, el modelado diario muestra evidencias de que el cor-

te en energía de los protones incrementa gradualmente con el tiempo, tal y como se espera dado la ausencia de características espectrales debidas a procesos de enfriamiento. Por otro lado, la curvatura medida en el espectro conjunto es más difícil de explicar en el caso leptónico, que requeriría una inyección de partículas con un corte bastante fuerte y que debería estar incluido en el espectro de inyección, con lo cual dicho corte espectral no podría explicarse por procesos de enfriamiento.

Por tanto, podemos concluir que el escenario hadrónico es el que mejor describe los datos y el que da un mejor ajuste de los mismos. De estas observaciones podemos estimar que la energía empleada por los protones es en torno al 20% de la energía total del material eyectado por la nova.

CONTRIBUYENDO A LA POBLACIÓN DE RAYOS CÓSMICOS

A pesar de que la mayoría de los protones contribuyen a la producción de rayos gamma en novae, algunos pueden escapar eventualmente del frente de choque. Estos protones tráfugos pasarían a formar parte de los llamados *rayos cósmicos*, partículas con carga que permean la Vía Láctea.

Las medidas obtenidas del espectro hadrónico utilizado para explicar la emisión de RS Oph, nos permite hacer estimaciones sobre las aportaciones de las novae a los rayos cósmicos de origen galáctico. Evidentemente, la contribución por parte de novae es menor que en el caso de supernovas, que son eventos mucho más violentos. Teniendo en cuenta la energía ($\sim 4.4 \times 10^{43}$ erg) y el número de novae por año (en torno a 50), obtenemos del orden de 0.1% de la contribución energética proveniente de supernovas (que son eventos más energéticos aunque menos frecuentes).

Sin embargo, a pesar de realizar una pequeña aportación a la totalidad de rayos cósmicos, las novae sí que incrementan significativamente la densidad de rayos cósmicos en su entorno cercano, creando burbujas que, en el caso de novae recurrentes, pueden llegar a alcanzar ~ 9 pc de tamaño.

DE CARA AL FUTURO

La detección por parte de MAGIC de rayos gamma en el rango 60-250 GeV provenientes de RS Oph ha permitido identificar las novae como un nuevo tipo de fuente emisora de rayos gamma de alta energía. Con estas observaciones hemos podido adentrarnos en el estudio de las poblaciones de partículas aceleradas en estos sistemas. Esto nos ha llevado a concluir que los protones son los responsables de la emisión gamma detectada por *Fermi-LAT* y *MAGIC*, cubriendo el rango de energía desde 50 MeV a 250 GeV. La forma de la distribución energética de las partículas inyectadas, el incremento temporal de las energías máximas y el ajuste del espectro apoyan esta conclusión. Además, hemos visto que los protones que logran escapar del sistema contribuyen a los rayos cósmicos de manera local, creando burbujas que se extienden varios parsecs.

Sin embargo, aún nos quedan muchos enigmas por resolver. No sabemos si el hecho de que RS Oph haya sido detectada a muy altas energías está conectado con su naturaleza como nova simbiótica recurrente o si

simplemente es la primera de una serie de nuevas detecciones. Mientras que sabemos que las novae clásicas son emisoras de rayos gamma de alta energía, aún nos queda averiguar si también pueden ser detectadas a muy altas energías. Mientras tanto, seguiremos trabajando para cazar nuevos estallidos estelares y responder a estas preguntas (aún) sin respuesta.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdo, A. A. et al. (Fermi-LAT Collaboration) "Gamma-ray emission concurrent with the nova in the symbiotic binary V407 Cygni". *Science* 329, 817–821 (2010).
- Acciari V.A. et al. (MAGIC Collaboration), "Proton acceleration in thermonuclear nova explosions revealed by gamma rays", *Nature Astronomy* (2022), <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01640-z>.
- Ackermann, M. et al. (Fermi-LAT Collaboration) "Fermi establishes classical novae as a distinct class of gamma-ray sources". *Science* 345, 554–558 (2014).
- Ahnen, M. L. et al. (MAGIC Collaboration) "Very high-energy γ -ray observations of novae and dwarf novae with the MAGIC telescopes". *A&A*. 582, A67 (2015).
- Cheung, C. C., Ciprini, S. & Johnson, T. J. (Fermi-LAT Collaboration) "Fermi-LAT gamma-ray detection of the recurrent nova RS Oph". *ATel* 14834 (2021).
- Geary, K. "Outburst of RS Ophiuchi". *VSNET-alert* 26131 (2021).
- Wagner, S. J. & HESS Collaboration "Detection of VHE gamma-ray emission from the recurrent nova RS Ophiuchi with HESS". *ATel* 14844 (2021).

EARENDEL. UNA ESTRELLA A REDSHIFT 6.2

En la era de los grandes telescopios, la naturaleza es aún capaz de superar a la tecnología gracias al efecto lente gravitatoria. Alrededor de grandes concentraciones de materia, como cúmulos de galaxias, este efecto es capaz de magnificar objetos distantes que estén perfectamente alineados con la lente y telescopios como el Hubble por factores de varios miles. En términos de brillo superficial, los objetos más brillantes en el óptico y compactos conocidos son estrellas gigantes que pueden alcanzar varios millones de veces la luminosidad del Sol.



José María Diego
Instituto de Física de Cantabria
jdiego@ifca.unican.es

Yolanda Jiménez Teja
Instituto de Astrofísica de Andalucía
yoli.jimenez.teja@gmail.com

Tom Broadhurst
Universidad del País Vasco
tom.j.broadhurst@gmail.com

Hasta hace unos pocos años, y a pesar de su gran luminosidad, estas estrellas solo podían ser estudiadas en nuestro universo local, hasta distancias comparables al cúmulo de Virgo. Desde 2018, con el descubrimiento de Ícaro (Kelly et al. 2018), una estrella luminosa a redshift $z=1.49$, el estudio de estrellas luminosas a distancias cósmicas es una realidad. El descubrimiento de Ícaro y su posterior estudio fue posible gracias a la magnificación extrema producida por un cúmulo de galaxias que focalizó las trayectorias de los fotones de Ícaro en los detectores del Hubble, igual que hace una lente ordinaria, logrando amplificar el flujo de Ícaro un factor entre 2000 y 3000, convirtiendo al conjunto Hubble+Cúmulo en un telescopio enorme con un tamaño efectivo del espejo primario de más de 100 metros. Tras el descubrimiento de Ícaro siguieron descubrimientos similares de varias estrellas a distancias comparables, o incluso superiores. No obstante ninguna de ellas ha estado tan alejada como Earendel (Welch et al. 2022), con un redshift estimado de $z=6.2$ y que, como las anteriores estrellas fue, también detectada con el telescopio espacial Hubble cerca de la zona de magnificación máxima de un cúmulo de galaxias. La luz que observamos de Earendel surgió de esta estrella hace 12700 millones de años, o unos 900 años después del Big Bang. Irónicamente el descubrimiento de Earendel tiene lugar en el momento en el que el sucesor del telescopio Hubble, JWST, está a punto de comenzar operaciones. JWST fue diseñado en parte para estudiar las primeras galaxias y estrellas como Earendel, que contribuyeron en una cierta proporción (aún por determinar con mayor precisión) a la época de reionización del universo. El telescopio Hubble, en lo que podrían ser sus últimos años en operación, muestra el camino a JWST en este nuevo campo del estudio de estrellas individuales a distancias cósmicas y amplificadas por valores extremos.

El descubrimiento de Earendel no hubiera sido posible sin la ayuda del efecto lente gravitatoria. Earendel se encuentra en una galaxia a redshift 6.2 formando un arco gigante de unos 15" de longitud. Dicho arco, bautizado con el nombre Sunrise en relación al amanecer de las galaxias, fue detectado por el Hubble en imágenes tomadas en 2016 y hasta la fecha es la galaxia más magnificada conocida por encima de redshift 5. El nombre de Earendel está en parte ligado al nombre de esta galaxia ya que Earendel era

usado en el pasado (en Inglés antiguo) para referirse a la primera estrella del amanecer. El nombre Earendel también hace honor a la literatura de Tolkien, que al igual que los telescopios actuales fue capaz de llevarnos a mundos lejanos y pasados.

Una de las curvas críticas del cúmulo de galaxias WHL0137-08 (a $z=0.566$ y que actúa como una potente lente gravitatoria) atraviesa el arco justo en la posición donde está Earendel. Diferentes modelos de lente gravitatoria de este cúmulo predicen que la curva crítica pasa por la posición de Earendel. Las curvas críticas son zonas en el plano de la lente relativamente pequeñas pero donde la magnificación es máxima. Cuando estas zonas de magnificación máxima se representan en el plano de la fuente se las conoce como cáusticas. Dentro de la galaxia Sunrise, Earendel está posicionada muy próxima a una de las cáusticas que atraviesan esta galaxia. Posiblemente otras estrellas estén incluso más cerca de la cáustica, pero para poder verlas sería necesario que tuviesen una luminosidad comparable a la de Earendel que tiene una luminosidad estimada de al menos varios millones de veces la luminosidad del Sol. Ya que estrellas tan luminosas son poco abundantes, solo la combinación de luminosidad y magnificación de Earendel hace posible que esta estrella sea visible

La magnificación cerca de una curva crítica escala con la distancia como A/d , donde A se puede aproximar por el radio de Einstein de la lente (unos $50''$ para un cúmulo como WHL0137-08) y d es la distancia a la curva crítica en segundos de arco. A distancias menores que la resolución espacial del Hubble la magnificación puede ser de varios cientos y llegar hasta varios miles para distancias muy pequeñas. Valores tan extremos de la magnificación sólo pueden observarse para objetos muy compactos, como estrellas, ya que la magnificación máxima de un objeto es inversamente proporcional a su tamaño. Así, en galaxias las magnificaciones más grandes que se han observado es de unas pocas decenas, aumentado hasta magnificaciones del orden de 100 para quasars. Estrellas en cambio pueden ser órdenes de magnitud más pequeñas y dado su reducido tamaño pueden estar lo suficientemente próximas a las cáusticas resultando en magnificaciones de hasta varios miles. La probabilidad de tener factores de magnificación extremos es baja, pero cuanto mayor

es la magnificación menor es la luminosidad de la estrella que se necesita para que esta pueda ser observada una vez es amplificada. De este modo la escasa probabilidad de tener un factor de magnificación elevado es parcialmente compensada por la mayor abundancia de objetos menos luminosos resultando en probabilidades razonables de observar estrellas muy cerca de las curvas críticas de lentes gravitatorias. Por ejemplo, una estrella luminosa a redshift $z>1$ con magnitud aparente 36 (sin efecto lente gravitatoria) pero amplificada por un factor 5000 sería observada con una magnitud aparente de 26.7, y por lo tanto detectable con exposiciones del orden de 1 hora con Hubble. En el caso de Earendel estimamos que la magnificación puede acercarse a 10000, lo cual haría de Earendel el objeto con la mayor amplificación jamás observado.

Una de las características del efecto lente gravitatoria es que imágenes que se forman cerca de curvas críticas aparecen en pareja, con una imagen siendo imagen especular de la otra y la curva crítica actuando como eje de simetría del par de imágenes. Cerca de Earendel existen dos puntos de luz no resueltos, con brillo similar y simétricamente situados con respecto a la posición de Earendel. Estos dos puntos son en realidad una de estas parejas de imágenes y corresponden a un pequeño cúmulo globular en la galaxia Sunrise que aparece amplificado por un factor más modesto de unas decenas. No obstante, en el caso de Earendel solo se observa un punto de luz (también no resuelto) lo cual solo se puede entender si la pareja de imágenes que necesariamente ha de formarse están separadas una de la otra por una distancia menor que la resolución de Hubble, o aproximadamente $0.1''$. Por lo tanto la distancia máxima a la que cada una de las dos imágenes puede estar de la curva crítica no puede ser mayor que $0.05''$.

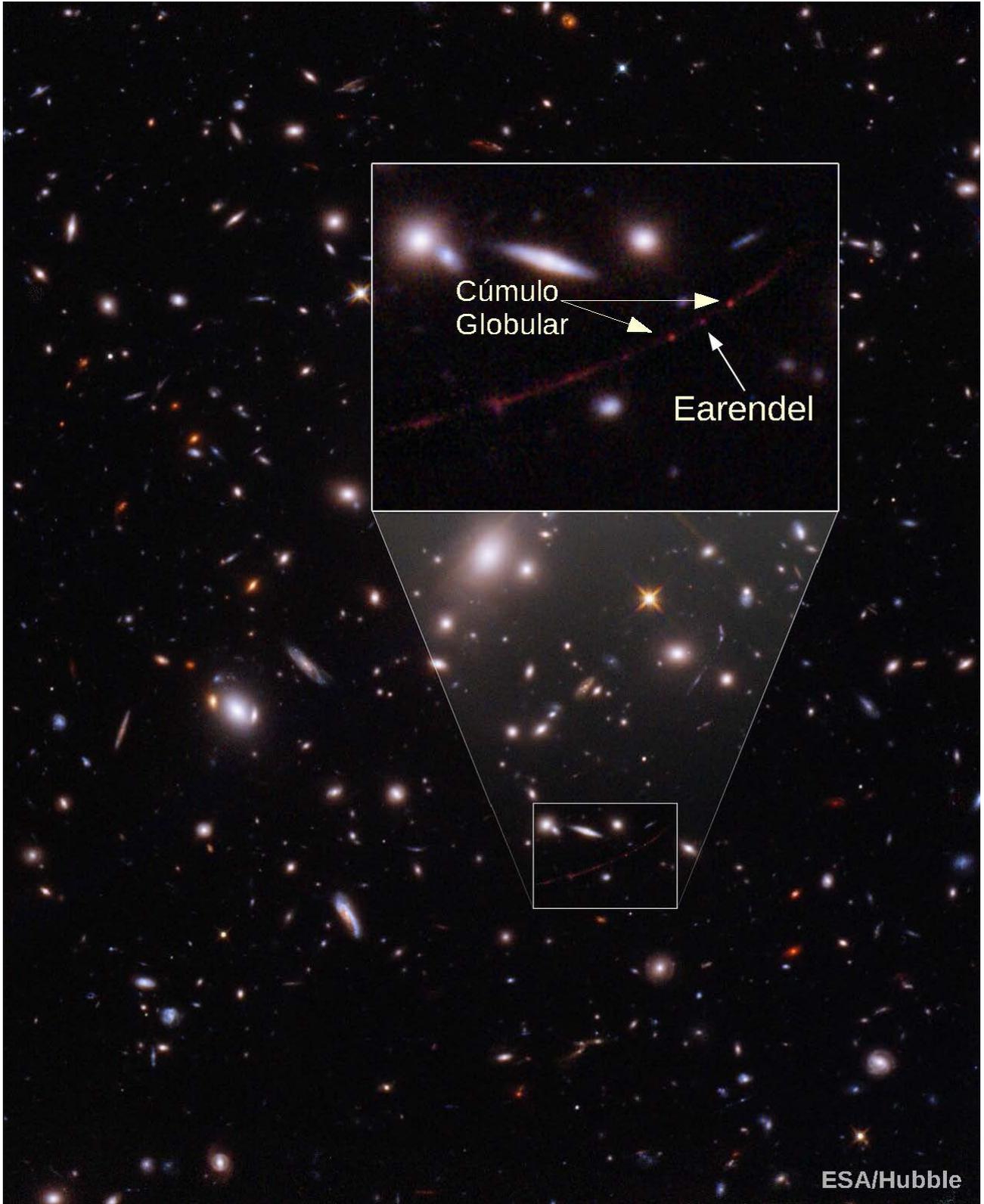
Cuando se tiene en cuenta cómo varía la magnificación con la distancia a la curva crítica (aproximadamente $50''/d$) automáticamente resulta en factores de magnificación de al menos 2000 después de tener en cuenta el flujo combinado de las dos imágenes no resueltas. Diversos modelos de lente gravitatoria desarrollados para describir este cúmulo llegan a conclusiones similares. Esta estimación de la magnificación combinado con el flujo observado, puede usarse para acotar los posibles

candidatos. Comparando el flujo estimado con modelos evolutivos en el diagrama H-R para distintas metalicidades indican que la estrella ha de tener al menos 50 veces la masa del Sol y luminosidades de al menos 1 millón de veces la Solar. Este tipo de estrellas tienen temperaturas típicamente entre 10000 K y 40000 K y suelen vivir unos pocos millones de años, por lo que Earendel habrá muerto ya hace muchos eones, pero su luz sigue viva y sigue iluminando el universo.

Las observaciones del Hubble no permiten extraer mucha más información sobre Earendel pero afortunadamente el nuevo telescopio James Webb tiene ya programada una observación de esta estrella. Con el James Webb será posible obtener mejores medidas fotométricas y en rangos espectrales no accesibles por Hubble. Dada la proximidad de Earendel a la cáustica del cúmulo, y si existe la fortuna de que el movimiento relativo de Earendel con respecto a esta cáustica es tal que se va acercando cada vez más a medida que pasa el tiempo, cabe la posibilidad de que la magnificación de Earendel siga aumentando durante los próximos años lo cual permitiría incluso obtener un espectro de la estrella. Dicho espectro podría confirmar sin apenas ambigüedad la metalicidad de la estrella y si se trata, como se sospecha, de una estrella de segunda generación o Pop II.

Las observaciones del James Webb permitirán también estudiar no solo una estrella a redshift $z=6.2$, sino también estrellas dentro del cúmulo WHL0137-08. Estrellas del medio intracúmulo que se posicionan cerca de la posición de Earendel (en proyección) actuarán como microlentes, introduciendo pequeñas distorsiones en la magnificación que se transforman en variaciones temporales en el flujo observado a medida que Earendel se mueve en relación a estas microlentes. Estas variaciones en flujo se espera que sean relativamente pequeñas (menos de una magnitud), pero estudiando el número de eventos microlente así como su duración se puede estimar tanto la abundancia de las microlentes (estrellas en el medio intracúmulo) así como su masa. Este tipo de observaciones pueden usarse incluso para estudiar candidatos exóticos de la materia oscura como son los agujeros negros primordiales que podrían contribuir como microlentes de masa elevada a las fluctuaciones de flujo de Earendel.

«Earendel está posicionada muy próxima a una de las cáusticas que atraviesan esta galaxia. Posiblemente otras estrellas estén incluso más cerca de la cáustica, pero para poder verlas sería necesario que tuviesen una luminosidad comparable a la de Earendel que tiene una luminosidad estimada de al menos varios millones de veces la luminosidad del Sol.»



Earendel forma parte del arco "Sunrise", una galaxia distante a $z=6.2$ fuertemente distorsionada por el cúmulo de galaxias WHL0137-08.

DESCUBRIMIENTO DE UN CENTENAR DE

Se trata de la muestra más grande de planetas errantes en una misma región de formación que nos permitirá estudiar el origen y las propiedades de este tipo de objeto tan particular.



Núria Miret Roig
Universidad de Viena
@nmiretroig

Los planetas interestelares, errantes, vagabundos tienen muchos nombres y son objetos muy particulares. Tienen como máximo 13 veces la masa de Júpiter, pero son huérfanos y no orbitan ninguna estrella (Figura 1). Su existencia se conoce desde principios del siglo XXI y se han detectado algunos, pero la falta de grandes muestras de planetas errantes impide comprender mejor su origen y propiedades.

La razón por la que son tan poco conocidos es que son extremadamente difíciles de detectar. Hasta la fecha, la mayoría de los planetas vagabundos encontrados no se han observado directamente, sino que se han detectado mediante el método de lentes gravitacionales. Esta técnica consiste en considerar al planeta como una lente que desvía la luz de una estrella más lejana. Entonces, por un momento, la estrella distante parece más brillante. Dependiendo del aumento de la luz y la duración, se puede conocer aproximadamente la masa del objeto lente y determinar si se trata de un planeta. La principal limitación de este método es que no conocemos la posición exacta del objeto, por lo que no podemos estudiarlo con más detalle tras la detección del evento.

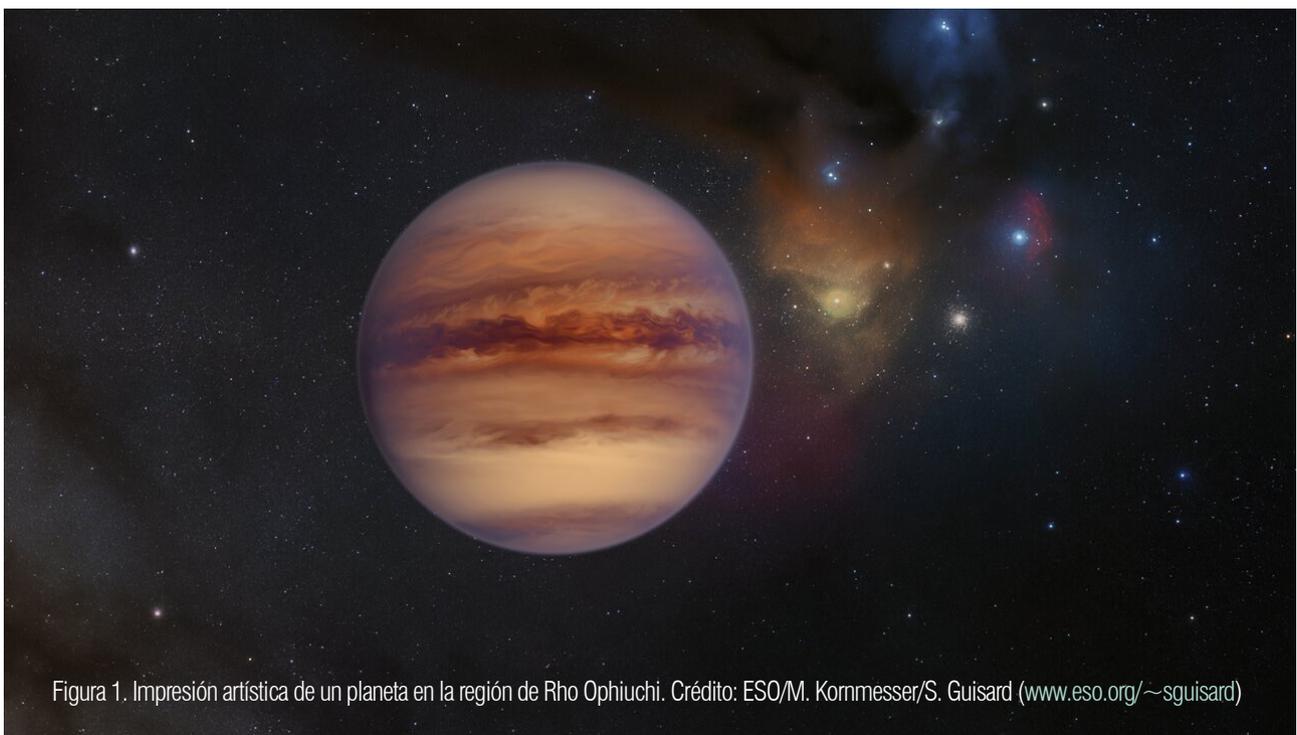


Figura 1. Impresión artística de un planeta en la región de Rho Ophiuchi. Crédito: ESO/M. Kommesser/S. Guisard (www.eso.org/~sguisard)

PLANETAS VAGANDO POR NUESTRA GALAXIA

UNA ENORME CANTIDAD DE DATOS, DE LOS MEJORES OBSERVATORIOS DEL MUNDO

Mi tesis propone un enfoque completamente diferente: hemos observado directamente planetas errantes. Estos planetas casi no emiten luz propia, solo un tenue brillo infrarrojo cuando son muy jóvenes, y gradualmente, a medida que se enfrían, se van apagando hasta volverse invisibles desde la Tierra. Por eso, en nuestro estudio, nos centramos en una de las regiones de formación estelar más cercanas al Sol: la región de Upper Scorpion y rho Ophiuchus (Figura 2). Esta región tiene una superficie de 170 grados cuadrados, está a unos 500 años luz de distancia, y se formó hace entre 1 y 10 millones de años (que es muy joven, el Sol, por ejemplo, tiene 4.500 millones de años).

Se necesitaron los telescopios más grandes de la Tierra capaces de recolectar grandes cantidades de luz para detectar estos planetas. Analizamos unas 80.000 imágenes de 18 telescopios diferentes (de 1 a 8 m de diámetro) de todo el mundo. Entre ellos destacan el telescopio Subaru de 8,2 m (NOAJ, Hawái), el telescopio Very Large Telescope (VLT) de 8,2 m (ESO, Chile), el telescopio Blanco de 4 m (NOIRLab, EE. UU.), el telescopio Mayall de 4 m (NOIRLab, EE. UU.) y el Telescopio de 3,5 m en el Observatorio CFHT (Hawái). Estas imágenes fueron obtenidas de los archivos públicos de estos observatorios y pacientemente complementadas con nuestras propias observaciones con estos mismos instrumentos, para finalmente cubrir aproximadamente 20 años de observación. Esta tesis me dio la oportunidad de participar personal-

Figura 2. Izquierda: Esquema de la constelación del Escorpión, con sus estrellas más características. La Luna está a escala. El marco negro indica la zona cubierta por este estudio y ampliada en la imagen de la derecha. Derecha: Imagen de la región de Upper Scorpion y Ophiuchus cubierta por este estudio. Los círculos rojos indican la posición de los cien planetas descubiertos. Crédito: ESO/N. Risinger (skysurvey.org)

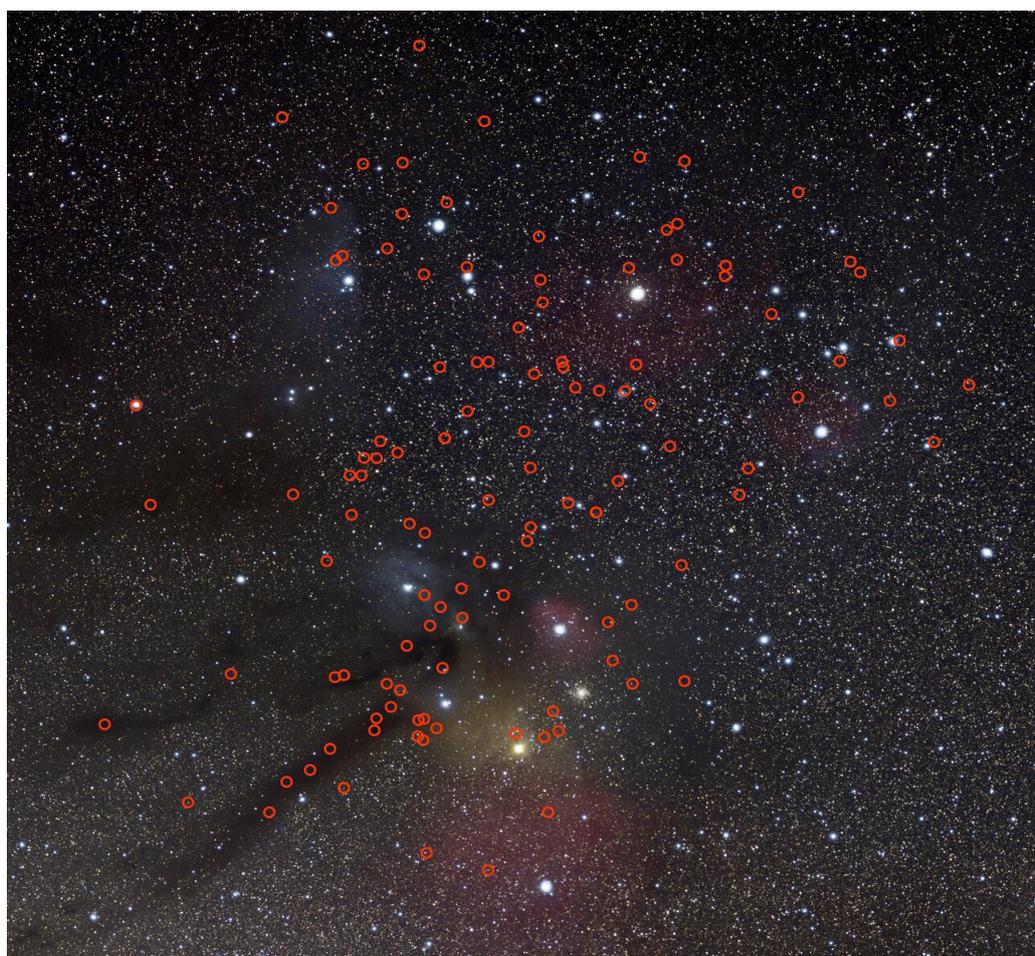




Figura 3. Izquierda: Foto mía bajo el cielo de Chile, junto al Telescopio Blanco. Derecha: Yo junto al instrumento OSIRIS en el Gran Telescopio de Canarias.

mente en algunas de estas observaciones en telescopios que sin duda fue una de las mejores experiencias como astrónoma. La figura 3 muestra dos fotos mías tomadas durante las noches de observación.

BUSCANDO AGUJAS EN UN PAJAR

Una vez pudimos detectar objetos lo suficientemente débiles como los planetas que estamos buscando, el siguiente desafío es identificarlos. Este reto es similar al refrán de encontrar "agujas en un pajar" en el sentido de que, solo hay cien planetas errantes entre decenas de millones de estrellas y galaxias! Para identificar los planetas aprovechamos que forman parte de una región de formación estelar y por tanto se mueven juntos a la misma velocidad y en la misma dirección en el espacio interestelar. Las estrellas que se encuentran delante o detrás de ellos y que no pertenecen a la región se mueven de manera distinta, y las galaxias, que están mucho más lejos, tienen movimientos prácticamente imperceptibles desde la Tierra. En este trabajo combinamos imágenes obtenidas

durante los últimos 20 años para ver cómo los objetos cambiaban de posición a lo largo del tiempo en la esfera celeste y así medir sus movimientos propios.

Al combinar información sobre el movimiento, el brillo y el color de cada objeto en nuestras imágenes, pudimos identificar alrededor de 3500 objetos jóvenes que se mueven juntos por el espacio, de los cuales entre 70 y 170 serían planetas vagabundos con masas entre 4 y 13 veces la masa de Júpiter. La Figura 4 es una imagen de la región estudiada y el objeto central, un diminuto punto rojo, corresponde a uno de los planetas que encontramos.

Los planetas jóvenes cambian de brillo muy rápidamente (se desvanecen) a medida que se enfrían y por esta razón es difícil distinguir entre objetos muy jóvenes y muy ligeros (masas planetarias) u objetos menos jóvenes pero algo más masivos (enanas marrones). De ahí la incertidumbre sobre el número total de planetas encontrados en nuestro estudio.

Figura 4. Esta imagen muestra una pequeña zona del cielo hacia Upper Scorpion y Ophiucus. Se centra en la posición de uno de los planetas recién descubiertos, que es el pequeño objeto rojo central. Crédito: ESO/Miret-Roig et al.



«Una fracción significativa de los planetas errantes que descubrimos deben haberse formado directamente, de forma aislada como una estrella, mientras que otros se formaron en un sistema planetario y luego lo abandonaron.»

Si uno hace la suposición (razonable, aunque no probada) de que la fracción de planetas que hemos encontrado en esta asociación es similar en otras partes de nuestra galaxia, esto indicaría que podría haber unos pocos miles de millones de planetas vagabundos en la Vía Láctea. Este resultado se refiere a los planetas gigantes, más grandes que Júpiter, que son los que pudimos detectar en nuestro estudio. Los planetas más pequeños, como Neptuno o incluso como la Tierra, tienen luminosidades mucho más tenues e indetectables a la distancia de la región de Upper Scorpion y Ophiuchus (a pesar de ser una de las más cercanas). Sin embargo, los planetas más ligeros son más comunes y mucho más fáciles de expulsar de los sistemas planetarios que los planetas más grandes, por lo que es probable que haya aún más por descubrir.

¿CÓMO SE FORMARON LOS PLANETAS ERRANTES?

Este estudio es la primera gran muestra de planetas vagabundos con el mismo origen: se formaron en la misma región de formación. Esta muestra es perfecta para estudiar el origen de estos exóticos objetos. Actualmente hay varios mecanismos propuestos para explicar la formación de planetas vagabundos. Algunas teorías sugieren que se formaron como pequeñas estrellas (debido a la contracción de las nubes de gas y polvo) y, por lo tanto, vagaron desde el principio. Otros sugieren que los planetas se formaron en sistemas planetarios, alrededor de una estrella, y luego fueron expulsados debido a interacciones gravitatorias con otros planetas del sistema con la estrella principal o estrellas compañeras (sistemas binarios) o fueron arrancados por una estrella que habría pasado muy cerca. Se sabe que estas y otras teorías producen planetas errantes, pero no está claro cuáles dominan la formación de estos objetos y qué contribución hace cada uno de estos mecanismos a la población total. Al comparar la fracción de planetas errantes que encontramos con las predicciones de diferentes modelos de formación de estrellas y planetas, descubrimos que ambos mecanismos son necesarios para explicar la gran población de planetas que encontramos. En otras palabras, una fracción significativa de los planetas errantes que descubrimos deben haberse formado directamente, de forma aislada como una estrella, mientras que otros se formaron en un sistema planetario y luego lo abandonaron.

LOS PLANETAS NOS AYUDAN A ENTENDER LA FORMACIÓN DE ESTRELLAS Y SISTEMAS PLANETARIOS

Está claro que la identificación y caracterización de los planetas errantes es un tema apasionante en sí mismo. Pero además, estos objetos también nos ayudan a comprender la formación estelar y planetaria en su conjunto. Dado que son muy ligeros (mucho más ligeros que las estrellas), son muy sensibles a las condiciones iniciales de la nube que los formó. Los planetas son particularmente sensibles a las interacciones gravitatorias con otros objetos más masivos o con el propio gas del que se forman las estrellas. Estudios como este, en otros entornos donde las condiciones son muy diferentes, serán cruciales para comprender mejor los diferentes procesos físicos que tienen lugar durante la formación de estrellas y planetas.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se presentó en el artículo "A rich population of free-floating planets in the Upper Scorpius young stellar association" publicado en *Nature Astronomy* (DOI: 10.1038/s41550-021-01513-x). Forma parte del proyecto COSMIC-DANCE liderado por Hervé Bouy y principal resultado de Núria Miret Roig para su doctorado.

El equipo está compuesto por Núria Miret-Roig (Laboratorio de Astrofísica de Burdeos, Univ. Bordeaux, CNRS, Francia [LAB]); Univ. de Viena,

Departamento de Astrofísica, Austria), Hervé Bouy (LAB), Sean N Raymond (LAB), Motohide Tamura (Departamento de Astronomía, Escuela de Graduados en Ciencias, Universidad de Tokio, Japón; Centro de Astrobiología, Institutos Nacionales de Ciencias Naturales, Tokio, Japón [ABC-NINS]), Emmanuel Bertin (CNRS, UMR 7095, Instituto de Astrofísica de París, Francia [IAP], Universidad de la Sorbona, IAP, Francia) David Barrado (Centro de Astrobiología [CSIC-INTA], Dpto. de Astrofísica, Campus ESAC, España), Javier Olivares (LAB), Phillip Galli (LAB), Jean-Charles Cuillandre (AIM, CEA, CNRS, Universidad Paris-Saclay, Universidad de París, Francia), Luis Manuel Sarro (Dpto. Inteligencia Artificial, UNED, España) Angel Berihuete (Dpto. Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Cádiz, España) & Nuria Huéramo (CSIC-INTA).

MATERIAL COMPLEMENTARIO

- Artículo original ([Nature Astronomy](#)):
- [Video](#), [poema](#) y [cancion](#) dedicados al artículo
- Artículo divulgativo en el [blog de Nature Astronomy](#)
- [Nota prensa ESO](#)
- [Nota prensa NOIRLab](#)
- [Nota prensa ING](#)
- [Nota prensa CFHT](#)
- [Nota prensa NAOJ](#)
- [Nota prensa Subaru](#)



La autora (izquierda) junto con Maxime Paillassa (centro), desarrollador de algoritmos de procesamiento de imágenes usados en este estudio, y Hervé Bouy (derecha), director de tesis de ambos, y director del proyecto ERC COSMIC-DANCe.

Sin lugar a duda, el estudio de los exoplanetas es uno de los campos de investigación más dinámicos, competitivos, sorprendentes y apasionantes de la Astrofísica en el siglo XXI. Quizás por las implicaciones a largo plazo que el descubrimiento de nuevos mundos implica en el imaginario colectivo, quizás porque durante siglos su investigación ha resultado incompatible con las limitaciones tecnológicas, es sin duda un tema que genera interés por igual tanto a científicos como al ciudadano de a pie. Y lo cierto es que el campo ha conseguido en las últimas décadas desarrollar proyectos específicos de instrumentación con una precisión difícil de imaginar unos pocos años antes y atraer a un enorme número de investigadores, una gran mayoría de ellos estudiantes de tesis y jóvenes postdocs, a esta gran aventura de descubrimiento.



Enric Pallé

Instituto de Astrofísica de Canarias
epalle@iac.es

EL CÓMPUTO DE NUEVOS MUNDOS

No por repetido deja de ser cierto y asombroso que en menos de 30 años hemos pasado de no tener la capacidad técnica de observar planetas en torno a otras estrellas a conocer más de 5 millares de ellos, determinando con precisión sus órbitas, masas y radios. Las búsquedas de planetas desde tierra y los telescopios espaciales Kepler y CoRoT nos han dado las primeras estadísticas y sabemos hoy en día que la formación de sistemas planetarios es común para la mayoría de las estrellas. En realidad sabemos ya que estadísticamente cada estrella posee más de un planeta (posiblemente muchos más) y que incluso estrellas evolucionadas y enanas blancas parecen tener sistemas planetarios, que podrían ser de segunda generación.

Al parecer, el tipo más común de planetas en la Vía Láctea, por lo menos a periodos orbitales cortos, son las súper-Tierras (con radios entre 1.2 y 2 radios terrestres - R_E -) seguidas de los sub-Neptunos (2-3 R_E), y curiosamente ninguna de las dos clases existen en nuestro Sistema Solar. Sin embargo, tanto las búsquedas de planetas por el método de velocidad radial como por tránsitos, los dos más comunes, son más sensibles a la detección de planetas con periodos cortos y masas (radios) grandes. Aunque GAIA y las búsquedas por imagen directa arrojaran muy pronto luz sobre la población de planetas gigantes de largo periodo, nos queda un amplio territorio que cuantificar a periodos largos y con importantes lagunas en nuestro conocimiento, como la tasa de formación de "tierras" (planeta con $R < 1.5 R_E$) en zona de habitabilidad entorno a estrellas F, G o K.

Así pues, los objetivos científicos de la comunidad están empezando a alejarse del simple aumento del número de planetas conocidos y los esfuerzos se concentran ya en dos grandes objetivos. El primero es el estudio estadístico de las poblaciones de planetas, lo que permitirá establecer las distintas clases de exoplanetas que existen, su frecuencia, sus procesos más comunes de formación, la dependencia de estos procesos según la estrella anfitriona, y la evolución de sus atmósferas. Para ello hacen falta grandes números de planetas con todas sus propiedades definidas con precisión.

El segundo objetivo es encontrar aquellos planetas (o sistemas planetarios) más interesantes y accesibles para acometer una caracterización detallada,

incluyendo la de sus atmósferas. Para conseguirlo existen dos caminos no excluyentes: encontrar planetas entorno a las estrellas más brillantes para mejorar la señal a ruido de nuestras observaciones y/o conseguir el menor contraste posible entre el radio de la estrella y el planeta. Esta segunda opción hace que los planetas rocosos más interesantes para su caracterización atmosférica se encuentren en torno a estrellas de tipo espectral M y por ello las búsquedas de planetas alrededor de este tipo de estrellas se han multiplicado. Actualmente, la misión TESS, dedicada a monitorizar todo el cielo en busca de planetas transitantes, cumple a la perfección este objetivo y en los últimos 3 años nos ha proporcionado el hallazgo de la mayoría de planetas rocosos que estudiaremos en detalles en las próximas décadas. Y espectrógrafos en tierra como CARMENES, entre otros, han medido sus masas. El censo de planetas transitantes de corto periodo orbital ($P < 30$ días) y cercanos a la Tierra está cerca de completarse.

Encontrar estos planetas accesibles a nuestra instrumentación es de especial interés porque, en última instancia, la caracterización de atmósferas de planetas rocosos en la zona de habitabilidad de sus estrellas, permitirá el ambicioso objetivo - verdadero motor intelectual del campo de la investigación en exoplanetas - de intentar detectar bio-marcadores: las posibles huellas de vida en otros planetas.

En la actualidad conocemos ya un gran número de planetas dentro de la zona de habitabilidad de sus estrellas, aunque claramente no todos son potencialmente habitables (ver Figura 1). Solo lo son aquellos planetas pequeños y rocosos donde se dan todas las condiciones para poder encontrar agua líquida en grandes extensiones de su superficie. Aún así hay razones para felicitarnos porque, tomando valores conservativos para la masa y radio que puede tener un planeta habitable, son ya 21 en total los planetas descubiertos que cumplen este requisito. El número crece hasta los 59 candidatos si se consideran valores un poco más optimistas, incluyendo planetas con radios entre 1.6 y 2.5 R_E . Sin embargo, es también justo recordar que está por determinar si un planeta en torno a una estrella M, como lo son la mayoría de estos planetas, es capaz o no de desarrollar y sostener vida en su superficie.

En los próximos años, los esfuerzos se redoblarán para caracterizar las atmósferas de estos planetas potencialmente habitables. Pero para ello deberemos romper una barrera tecnológicamente formidable: la exploración atmosférica de planetas con radio inferior a 1.5 R_E y alto peso molecular.

LA CARACTERIZACIÓN DE ATMÓSFERAS

La observación de las atmósferas planetarias es necesaria para entender los procesos de formación de sistemas planetarios, ya que la composición nos da una idea del material primigenio del que se formaron los planetas y de las posibles migraciones que han sufrido hasta sus órbitas actuales. Por otro lado la composición atmosférica nos permite romper la degeneración que impone una clasificación de la naturaleza de un planeta basada solo en los valores de masa, radio y densidad (dos planetas con densidad promedio similares pueden tener núcleos y atmósferas con composición y extensiones extremadamente distintas).

En la actualidad existen varias metodologías para el estudio de atmósferas planetarias, que son:

1- Espectroscopía o espectro-fotometría diferencial de tránsitos y/o ocultaciones: esta técnica permite desde el espacio o desde Tierra medir la composición química de una atmósfera. Desde el espacio está limitada por el ruido fotónico, y por tanto la capacidad colectora del espejo. Los datos más precisos hasta la fecha provienen del *Hubble Space Telescope* (HST) y *Spitzer*, y con el lanzamiento del *James Webb Space Telescope* (JWST) la espectro-fotometría se podrá aplicar a planetas desde Júpiteres Calientes a Neptunos templados, y quizás a algún planeta rocoso caliente, pero no podrá sondear las atmósferas de planetas como el nuestro. Desde tierra, la limitación es la atmósfera terrestre y la necesidad de una o varias estrellas de comparación para eliminar en lo posible a esta última. Los telescopios de clase 8-10 metros han alcanzado precisiones comparables a las observaciones espaciales, pero la siguiente generación de telescopios extremadamente grandes no tendrá instrumentos con campos de visión lo suficientemente grandes como para aplicar estas técnicas diferenciales, que por otro lado son solo aplicables a planetas que transitan.

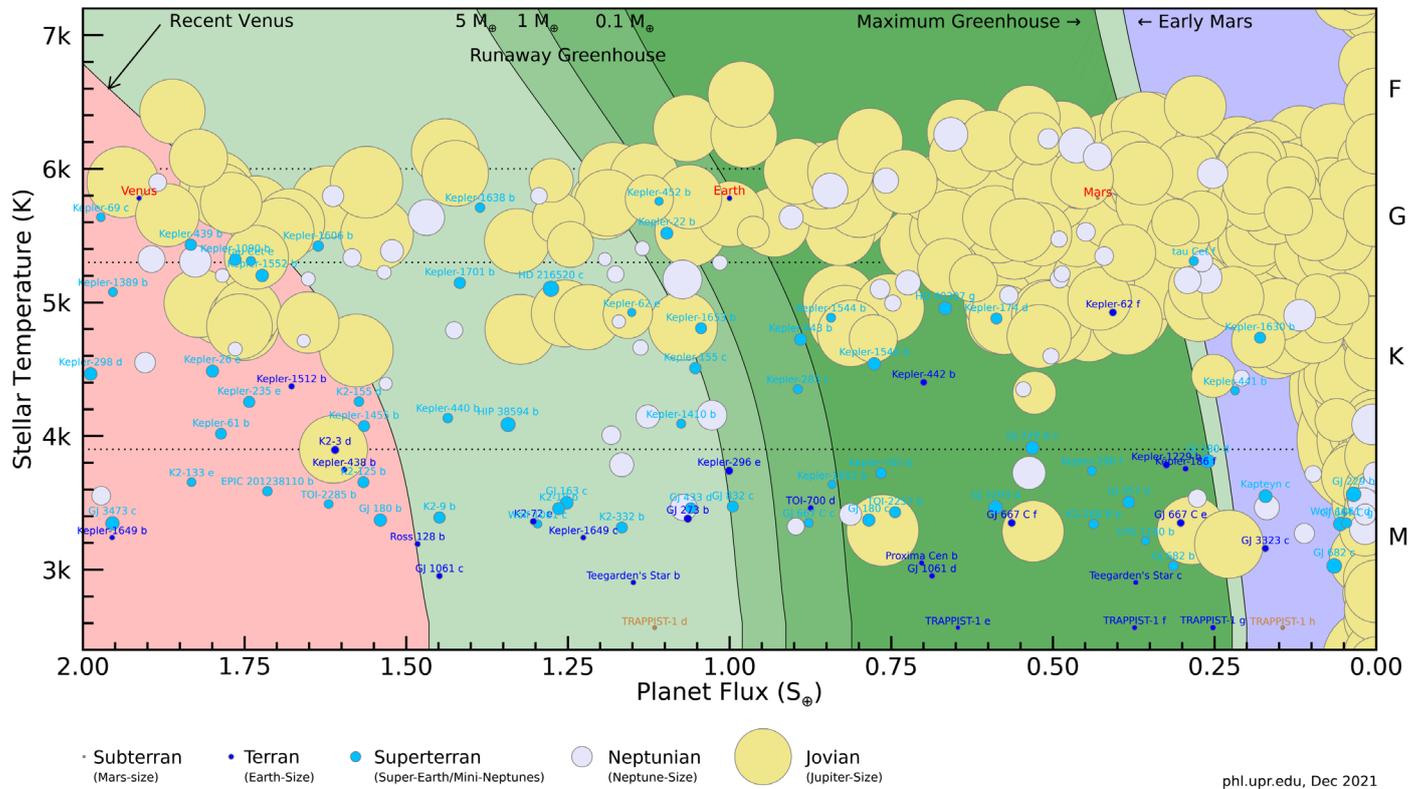


Figura 1. La figura muestra todos los planetas cerca de la zona habitable (el tono verde más oscuro es la zona habitable conservadora y el tono verde más claro es la zona habitable optimista). Solo se etiquetan aquellos planetas con menos de 10 masas terrestres o 2,5 radios terrestres. El tamaño de los círculos corresponde al radio de los planetas. Crédito: PHL @ UPR Arecibo.

2- Detección Directa: La detección directa de exoplanetas ha dado pasos cuantitativos enormes en los últimos años, pero las detecciones alcanzables solo se aplican a gigantes gaseosos alejados cientos o miles de UA de su estrella central y en general jóvenes, brillando todavía con luz propia. La aplicación de estas técnicas para la detección de la atmósfera de un planeta habitable pasa necesariamente por coronografía o interferometría en el espacio y por tamaños de telescopio extremadamente grandes.

3- Espectroscopía de alta dispersión: La espectroscopía de muy alta dispersión espectral permite separar la luz de la estrella de la del planeta (y de la de nuestra propia atmósfera) explotando las distintas velocidades (desplazamientos Doppler) de los tres sistemas. Esta técnica, que solo es posible desde tierra por el momento, ya se ha aplicado con buenos

resultados tanto a la detección del tránsito de un planeta (detectando la luz transmitida por su atmósfera) como en las variaciones de la luz reflejada por el planeta a lo largo de su órbita (sin necesidad de tránsito). La principal ventaja es que permite “ver” a través de la atmósfera terrestre. La progresión de resultados y detecciones con esta técnica en los últimos años es vertiginosa y es, sin lugar a dudas, la más prometedora para las próximas décadas.

EL FUTURO

Para seguir avanzando y cumplir los dos objetivos científicos que hemos discutido con anterioridad, la comunidad se está preparando con diversas misiones espaciales e instrumentos en tierra. La primera, el JWST ya es una realidad. Insertada con éxito en su órbita y en pleno proceso de comisionado, las pocas imágenes que se han hecho públicas

hasta la fecha pronostican el éxito de una misión que está destinada a revolucionar el campo de las atmósferas planetarias. Donde hasta ahora teníamos medidas del espectro de transmisión de planetas gigantes (y unos pocos Neptunos), observados con el HST entre 0.5 y 1.7 micras, JWST proporcionará espectroscopía desde 0.6 hasta las 28 micras con una señal a ruido muchísimo más elevada. Eso permitirá la exploración simultánea de varios rasgos moleculares y disminuirá la degeneración en los modelos de composición atmosférica que ofrece un rango espectral más corto. JWST sin embargo se queda corto para el estudio de planeta rocosos en zona de habitabilidad, quizás con alguna contada excepción, como el sistema planetario Trappist1.

A JWST le seguirá PLATO, un buscador de planetas por el método de tránsitos similar a CoRoT, Kepler y la actual TESS. PLATO sin embargo, está enfocado a la búsqueda de sistemas planetarios similares a la Tierra y el Sol. Con 26 cámaras fotométricas apuntando una región del cielo de 2250 grados cuadrados durante meses o años, PLATO monitorizará millones de estrellas en busca de las señales de tránsito de planetas terrestres. La gran aportación de PLATO, sin embargo, será su capacidad para aplicar astrosismología en las estrellas brillantes con planetas. El radio de un planeta se mide en relación al radio de su estrella, y por tanto los errores en la determinación del radio estelar dominan los errores en el radio planetario. Esta disminución en la incertidumbre en los radios estelares implicará una mayor precisión en los diagramas de masa/radio de los exoplanetas conocidos, lo que implicará a su vez un conocimiento más sólido de la composición de esos planetas, como la fracción de agua y volátiles.

En 2028 ESA espera lanzar ARIEL, una misión dedicada al estudio del espectro de transmisión, emisión y curvas de fases de exoplanetas ya conocidos. Aunque la capacidad de ARIEL para la caracterización de una atmósfera será relativamente modesta comparada con JWST, ARIEL está pensada como una misión estadística, que observará un millar de exoplanetas de forma sistemática y cubriendo simultáneamente entre 0.5 y 8 micras. ARIEL está destinada a ser la misión que revele los patrones atmosféricos en los que se distribuyen los mundos en nuestra galaxia, estableciendo por ejemplo la frecuencia de

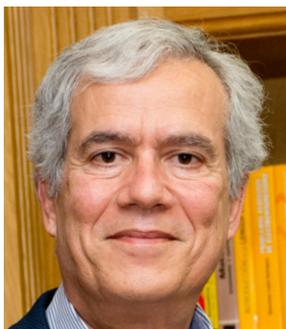
nubosidad, la presencia de capas de inversión, la redistribución de energía y circulación, y las dependencias de la composición química con el grado de irradiación estelar. ARIEL además, arrojará luz sobre los procesos de formación más comunes de estos planetas ya que una caracterización en detalle de la atmósfera de un exoplaneta proporciona información sobre la historia evolutiva del sistema.

Pero los esfuerzos en tierra no se quedan atrás. Los tres grandes telescopios extremadamente grandes (ELTs) propuestos hasta la fecha, se están diseñando para ser equipados con instrumentación dedicada a la investigación en exoplanetas. Aunque los tres telescopios planean instrumentación parecida, me concentro aquí en el mayor de ellos, el European Extremely Large Telescopes (E-ELT) de 42 metros de apertura, que contará con HARMONI y METIS como instrumentos de primera luz, ambos con una gran capacidad para la detección de luz directa de atmósferas de planetas gigantes. Pero sin duda el instrumento ANDES, un espectrógrafo de alta resolución que cubrirá desde el visible hasta la banda K, es uno de los más prometedores. ANDES aprovechará las técnicas para estudios de atmósferas de exoplanetas con alta resolución espectral desarrolladas con instrumentos como HARPS y CARMENES, y que ahora se aplican en telescopios de 8-10 metros de apertura. El estudio de atmósferas de exoplanetas ha sido elegido como el principal objetivo científico del instrumento y definirá sus requerimientos técnicos. Si ANDES responde a las expectativas, será el primer instrumento en fase de desarrollo teóricamente capaz de darnos la primera detección de una exobiosfera entorno a una estrella tipo M.

Más allá, todas las agencias espaciales planean proyectos espaciales para el estudio de planetas terrestres entorno a estrellas como el Sol. A pesar de la ilusión que generan y del empuje de la comunidad, tanto por coste como por el desarrollo que exigen, existe el consenso de que no veremos ninguna de ellas antes de la década del 2040. Serán pues las nuevas generaciones de astrofísic@s que ahora empiezan sus doctorados quienes analicen los datos que estas misiones revelaran. La aventura del descubrimiento de otros mundos más allá de la Tierra continúa, en lo que será un proceso multi-generacional y apasionante.

WEBB: EL FUTURO DE LA ASTRONOMÍA

Tras décadas de diseño, integración y numerosas campañas de pruebas, el Telescopio Espacial James Webb (JWST, de aquí en adelante Webb), una colaboración entre NASA, ESA y la Agencia Espacial Canadiense, fue lanzado desde el Centro Espacial Europeo, en la Guayana Francesa, el 25 de diciembre del 2021. Desde entonces, Webb se ha desplegado con éxito, ha llegado a su órbita de destino, alineado el espejo primario segmentado, y continúa el proceso de puesta a punto y verificación de los instrumentos.



Macarena García Marín
Agencia Espacial Europea
Macarena.Garcia.Marin@esa.int

Santiago Arribas Mocoroa
Centro de Astrobiología (CSIC/INTA)
arribas@cab.inta-csic.es

Luis Colina Robledo
Centro de Astrobiología (CSIC/INTA)
colina@cab.inta-csic.es

Las primeras imágenes enviadas a tierra, de una nitidez extraordinaria, confirman la promesa de Webb de proporcionar una visión única del universo en el infrarrojo. Los programas científicos del primer año de observaciones fueron seleccionados en 2021 y cubren una gran variedad de áreas: desde observaciones de galaxias primigenias hasta objetos del Sistema Solar, pasando por cúmulos de galaxias, galaxias con núcleos activos, exoplanetas, estrellas pulsantes de neutrones, kilonovas, y discos protoestelares, entre otros. El futuro de la astronomía infrarroja está aquí, y promete grandes avances en nuestro conocimiento del cosmos

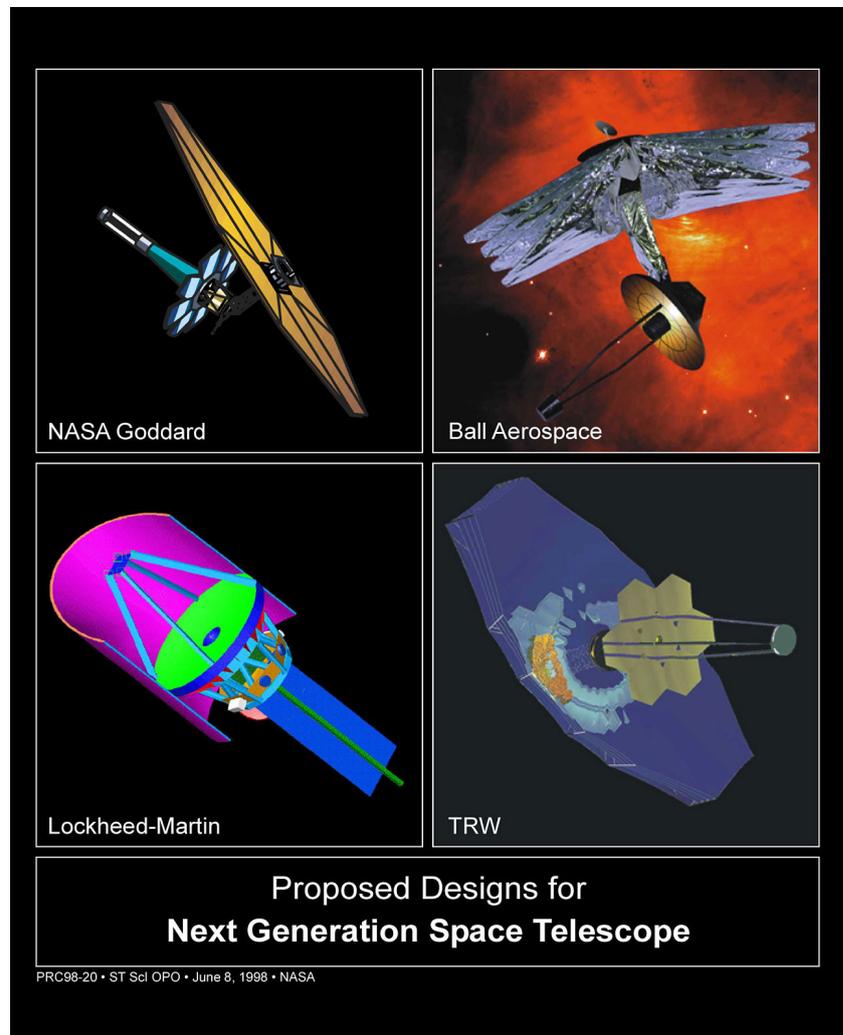
CONTEXTO HISTÓRICO

En 1989, aproximadamente un año antes del lanzamiento del Telescopio Espacial Hubble, se iniciaron las discusiones sobre cuál debería ser su sucesor. En el primer taller organizado al respecto, “*The Next Generation Space Telescope: A 10 m Class UV-Visible-IR Successor to Hubble*”, se propuso la idea de construir un telescopio de gran tamaño, de 10 a 16 metros, enfriado pasivamente hasta 100 K para reducir el impacto de su emisión térmica, y que ofreciera imagen y espectroscopia limitada por difracción desde 0.3 μm hasta longitudes de onda de al menos 10 μm . Como veremos más adelante, el diseño final no se ajusta exactamente a estas especificaciones, pero es fiel a las ideas básicas enunciadas hace más de 30 años.

En 1996 NASA solicita un estudio de viabilidad del proyecto al Goddard Space Flight Center (GSFC) y al Space Telescope and Science Institute (STScI). El proyecto comienza a tomar forma, y varias empresas y entidades son elegidas para proponer el diseño y evaluar los costes del proyecto (Figura 1). Finalmente, en 1999 NASA selecciona Ball Aerospace y TRW (posteriormente Northrop Grumman), que trabajan conjuntamente en el diseño final del observatorio. Ese mismo año ESA y la Agencia Espacial Canadiense son invitadas a participar en estudios de viabilidad de los instrumentos.

En 2002 el telescopio recibe su nombre definitivo, James Webb Space Telescope, se ultiman los acuerdos entre las diferentes agencias y entidades internacionales e industria, y se finaliza la distribución de responsabilidades. En 2005, el vehículo de lanzamiento Ariane 5 es aprobado.

Figura 1. Diseños originales de Webb (entonces conocido como el "Next Generation Space Telescope") presentados en el concurso convocado por NASA en 1998. Crédito: NASA/ESA.



La contribución europea a Webb incluye el segmento de lanzamiento desde el Centro Espacial Europeo con un cohete Ariane 5, dos instrumentos, NIRSpec (Near Infrared Spectrograph) y MIRI (Mid Infrared Instrument), y personal de apoyo en STScI. La contribución española a Webb es significativa y abarca desde etapas muy tempranas, con contribuciones en los estudios para definir la participación europea en el proyecto, hasta la actual fase de verificación en órbita de los instrumentos NIRSpec y MIRI. Incluye el diseño y construcción del Simulador del Telescopio para MIRI (MTS, MIRI Telescope Simulator), liderado por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y pieza clave en el proceso de calibración de MIRI en tierra. Asimismo,

varias empresas nacionales del sector aeroespacial han contribuido al desarrollo de varios componentes para estos instrumentos. Además, España es miembro del Consorcio Europeo de MIRI, e investigadores españoles son miembros de los equipos científicos de los instrumentos MIRI y NIRSpec, y son responsables de varios programas científicos que se llevarán a cabo durante el primer año de observaciones.

La construcción del telescopio comienza en 2002, e incluye numerosas fases de construcción, integración y campañas de test de todos los elementos de Webb. El diseño final del telescopio es abierto, con un espejo primario de 6.5 metros compuesto por 18 segmentos



Figura 2. El telescopio Webb en Northrop Grumman, Redondo Beach, California. En esta imagen el parasol de 5 capas está completamente desplegado. Los espejos primario (18 segmentos hexagonales, 6.5 m) y secundario (espejo circular, 0.74 m) se muestran plegados y en la configuración de lanzamiento. Crédito: Northrop Grumman.

de berilio recubiertos de una capa extremadamente fina de oro (Figura 2). Un parasol de 21 m x 14 m, formado por 5 capas de kaptón, protege al telescopio y sus instrumentos de la radiación solar, y proporciona enfriamiento pasivo hasta temperaturas inferiores a 40 K. Esto es vital para reducir la radiación térmica producida por el observatorio, y conseguir que sea la luz zodiacal la que limite el fondo de los instrumentos que operan en el infrarrojo cercano entre ~ 0.6 y $5 \mu\text{m}$: NIRSpec, NIRCам (Near Infrared Camera) y NIRISS (Near Infrared Imager and Slitless Spectrometer). El parasol divide Webb en dos zonas térmicas claramente delimitadas, que presentan un gradiente de

temperatura de más de 300 K. Las observaciones en el infrarrojo medio son posibles gracias a un sistema de refrigeración criogénica que permite que el instrumento MIRI (~ 5 a $28 \mu\text{m}$) opere a temperaturas inferiores a 7 K. Estas temperaturas tan bajas, solo unos pocos grados por encima del cero absoluto, son necesarias para combatir la emisión térmica del telescopio. Finalmente, se requiere que Webb esté limitado por difracción a partir de $2 \mu\text{m}$, con una calidad óptica excelente en todo el rango de longitud de onda (~ 0.6 a $28 \mu\text{m}$). El resultado final es un telescopio tan grande que tiene que plegarse para poder encapsularlo en el carenado del cohete Ariane 5.

Pasemos ahora a hablar algo más en detalle de los instrumentos a bordo de Webb. Se trata de cuatro instrumentos científicos y un instrumento de guiado, agrupados en el módulo de los instrumentos (ISIM, Integrated Science Instruments Module, Figura 3) situado detrás del espejo primario.

Operando a longitudes de onda entre 0.6 y 5 μm , los instrumentos del infrarrojo cercano son NIRC*am*, NIRSpec y NIRISS. NIRC*am*, construido por la Universidad de Arizona, ofrece imagen, coronografía y espectroscopia sin rendija, y ha sido crucial para alinear el espejo primario durante los primeros meses después del lanzamiento. NIRSpec, proporcionado por ESA, ofrece varios modos espectroscópicos: rendija, unidad de campo integral, y una matriz

configurable de en torno a un cuarto de millón de rendijas que permite obtener espectros de 100 o más objetos simultáneamente. NIRISS, construido por la Agencia Espacial Canadiense, proporciona imagen y espectroscopia sin rendija. El instrumento del infrarrojo medio, MIRI, opera entre 5 y 28 μm . El módulo óptico de MIRI fue proporcionado por el Consorcio Europeo de MIRI y ESA. El sistema criogénico y los detectores son contribución del NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). MIRI ofrece imagen, coronografía, espectroscopia con y sin rendija y una unidad de campo integral con cuatro canales. Finalmente, el instrumento de guiado FGS (Fine Guidance Sensor), construido por la Agencia Espacial Canadiense, garantiza la precisión del apuntado del telescopio.

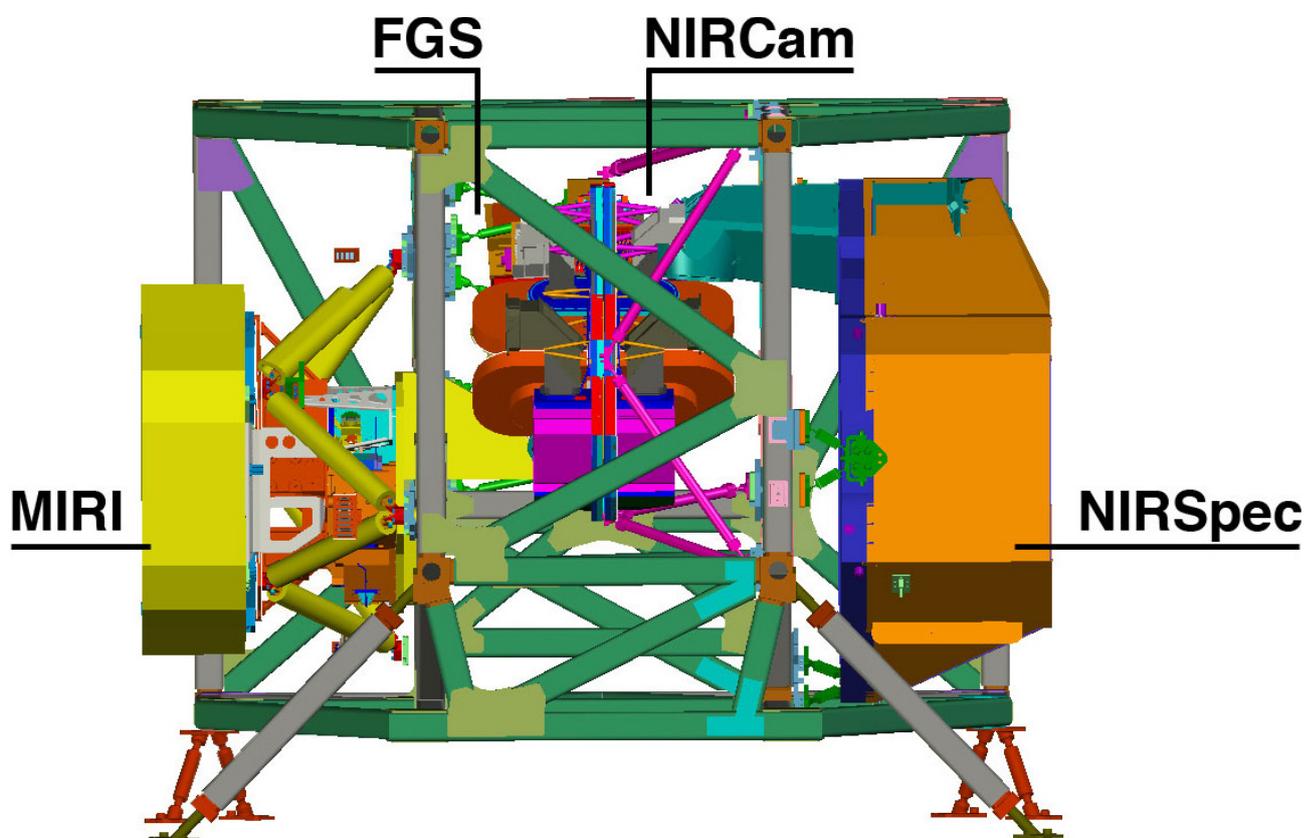


Figura 3. Esquema del módulo de los instrumentos de Webb o ISIM (Integrated Science Instruments Module). La etiqueta FGS indica la posición del instrumento de guiado FGS y del instrumento científico NIRISS. Crédito: NASA.

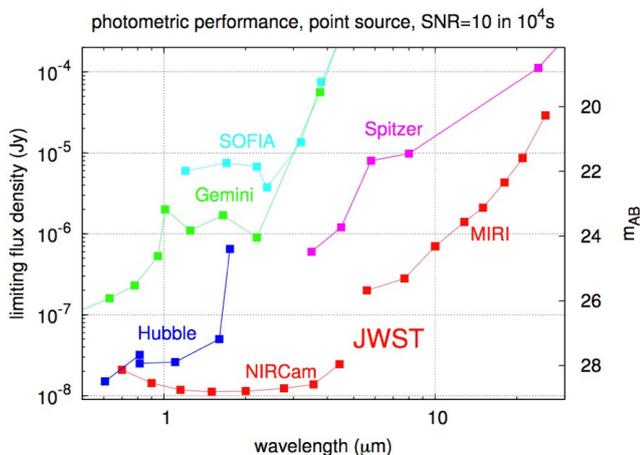


Figura 4. Sensibilidad en imagen comparada con otros observatorios. Crédito: STScI

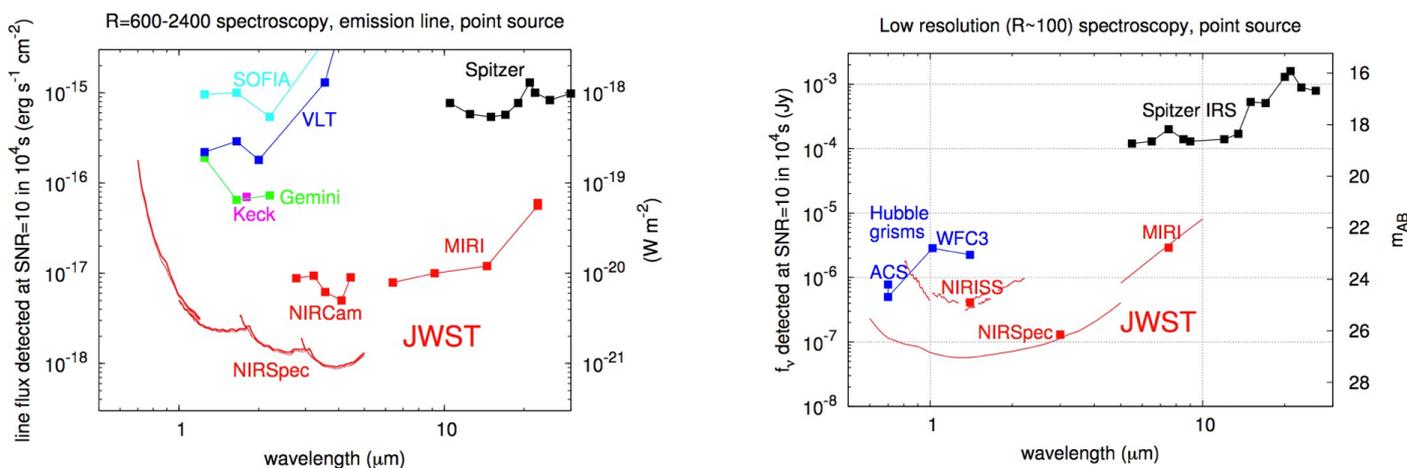


Figura 5. Sensibilidad en espectroscopia comparada con otros observatorios. Crédito: STScI.

La batería de instrumentos de Webb ofrece un total de 17 modos de observación que serán utilizados durante el primer año de operaciones científicas. Dado el tamaño del espejo primario y la exquisita calidad de los instrumentos y sus detectores, los datos de Webb ofrecerán una ganancia en sensibilidad (ver figuras 4 y 5) y resolución espacial de varios órdenes de magnitud superiores a las de telescopios previos.

LA PROMESA CIENTÍFICA DE WEBB

Uno de los momentos claves en la historia y desarrollo del telescopio Webb fue la definición

de sus objetivos científicos, que a su vez cimentaron los requerimientos en el telescopio y sus instrumentos. Los objetivos científicos se agrupan en cuatro grandes temas: el estudio del universo primigenio, entender cómo se forman y evolucionan las galaxias y sus agujeros negros, estudiar el ciclo vital de las estrellas e investigar la formación y evolución de sistemas planetarios, incluyendo nuestro sistema solar. A estas áreas de investigación hay que añadir el estudio de exoplanetas, en concreto de sus atmósferas, por medio de observaciones de se-

ries temporales de tránsitos planetarios. Una disciplina relativamente joven pero que ocupará un porcentaje significativo del tiempo de observación de Webb.

Todas estas áreas de investigación se benefician de las ventajas que tiene observar en el infrarrojo, que nos permitirá: detectar características espectrales del rango ultravioleta y visible en las primeras estrellas y galaxias que se formaron en el universo, penetrar las densas capas de polvo para observar los objetos ocultos tras ellas, y observar objetos fríos, como los exoplanetas.

A pesar de la existencia de estos temas generales, la flexibilidad, resolución, y sensibilidad de los instrumentos hacen posible observar cualquier tipo de programa innovador. El ciclo anual de llamadas de propuestas, y la posibilidad de pedir [tiempo del Director](#) o [Fuentes de Oportunidad](#), hacen posible observaciones científicas novedosas o imprevistas.

LANZAMIENTO Y PRIMEROS MESES

Los primeros seis meses después del lanzamiento se dedican a la fase de verificación en órbita. En el momento de escribir este artículo han pasado casi cinco meses desde el lanzamiento de Webb. En esta sección revisaremos las actividades claves que han tenido lugar en este periodo de tiempo, y hablaremos de las que todavía faltan por ejecutar.

El lanzamiento del Webb fue una de las áreas de responsabilidad de la ESA. Entre otros motivos, esta decisión fue tomada porque el Puerto Espacial Europeo, en la Guayana Francesa, es una localización geográfica óptima. Al estar tan cerca del ecuador la velocidad de rotación de la Tierra proporciona un impulso extra al cohete durante el lanzamiento. Además, Ariane acumula más de 250 lanzamientos completados con éxito, y el cohete Ariane 5 tenía las dimensiones adecuadas para, tras una serie de ajustes y optimizaciones, poder albergar a Webb en su carenado (Figura 6).



Figura 6. Esta fotografía captura el momento en el que Webb, en su configuración plegada en la parte inferior de la fotografía, es encapsulado en el carenado del cohete Ariane 5. Crédito: ESA/CNES/Arianespace

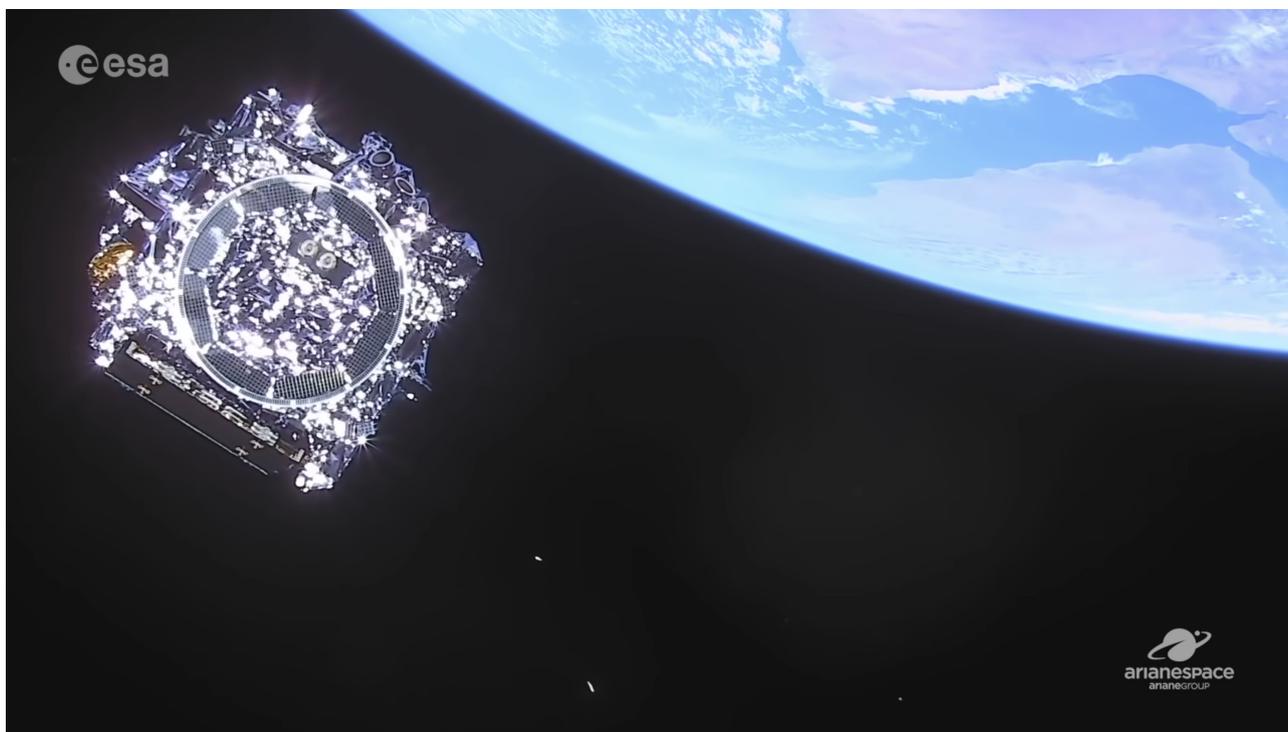
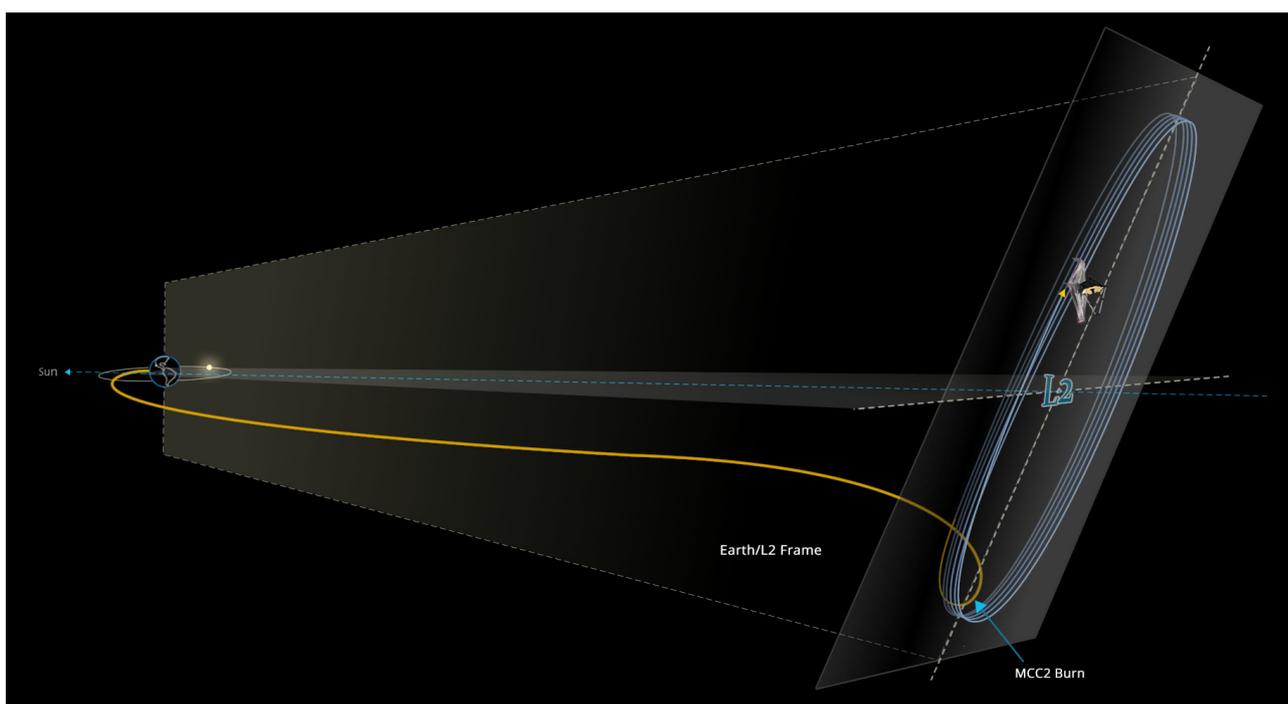


Figura 7. Separación final del telescopio Webb, vista desde el módulo de la nave del cohete Ariane 5. Crédito: Arianespace.

Figura 8. Trayectoria seguida por Webb desde su lanzamiento hasta la inserción en la órbita alrededor de L2. Como vemos en este esquema el parasol siempre protege el telescopio de la radiación solar. Crédito: Steve Sabia/NASA Goddard



El lanzamiento tuvo lugar el 25 de diciembre del 2021. Como siempre ocurre en estos casos, la primera media hora es crítica. Inicialmente los propulsores del cohete proporcionan el 90% de la energía necesaria para completar el lanzamiento, utilizando 2 toneladas de combustible por segundo. Tras 1 minuto, Ariane 5 rompe la barrera del sonido, y las diferentes etapas o secciones del cohete se van desprendiendo sucesivamente. A los 27 minutos, después de recibir un impulso final, el telescopio se separó completamente del módulo de la nave (Figura 7). Varios segundos después el panel solar se desplegó, y Webb comenzó su viaje de un mes con destino hacia su órbita final alrededor del punto de Lagrange 2, L2, situado a 1.5 millones de kilómetros de la Tierra. El lanzamiento resultó en un significativo ahorro de combustible, que se utilizará para mantener a Webb en su órbita durante mucho más de 10 años, alargando así significativamente la vida útil de la misión.

En su viaje de un mes a L2 el telescopio tenía que pasar de su compacta configuración de lanzamiento a su configuración nominal, completamente desplegado. Este proceso fue arriesgado y complicado; cientos de mecanismos no redundantes tenían que abrirse, liberarse o ponerse en posición en el momento adecuado para que el despliegue tuviera éxito. Durante este tiempo, el equipo de Webb trabajó sin descanso para abrir y tensar el parasol, elevar la torre que lo separa del espejo primario, posicionar el espejo secundario y abrir las alas laterales del espejo primario. El 24 de

enero del 2022, con Webb en su configuración nominal, los propulsores de la nave se utilizaron para proporcionar un impulso extra al telescopio, e insertarlo en su órbita de destino, alrededor de L2 (Figura 8).

En L2 Webb orbita alrededor del eje Sol-Tierra, lo que le permite tener el parasol siempre orientado hacia el Sol, manteniendo así el espejo primario y los instrumentos protegidos de altas temperaturas y en perpetua sombra. Dada la configuración de la órbita, Webb siempre tiene acceso a casi la mitad del cielo, y en el transcurso de un año puede observar cualquier objeto celeste.

El siguiente desafío en el proceso de verificación en órbita de Webb fue la identificación de todos los segmentos del espejo primario, que marca el primer paso en el complejo proceso de alineamiento que duró varios meses. En resumen, tras el lanzamiento, los 18 segmentos operan como 18 telescopios individuales. El objetivo del proceso de alineamiento es que operen como uno solo. Para identificar los espejos se realizó un mosaico muy grande, del tamaño de la Luna llena, de una única estrella. Hicieron falta más de 1500 imágenes en 156 posiciones diferentes alrededor de la estrella, que se eligió por estar relativamente aislada y ser fácil de reconocer. Gracias a estos datos tomados con NIRCcam, el sensor de frente de onda del observatorio, fue posible identificar todos los segmentos de los espejos (Figura 9). En el momento en que se tomaron estos datos NIRCcam estaba por encima de su temperatura operacional.

Figura 9. Fase inicial de alineamiento de los segmentos del espejo primario: identificación. Crédito: NASA.



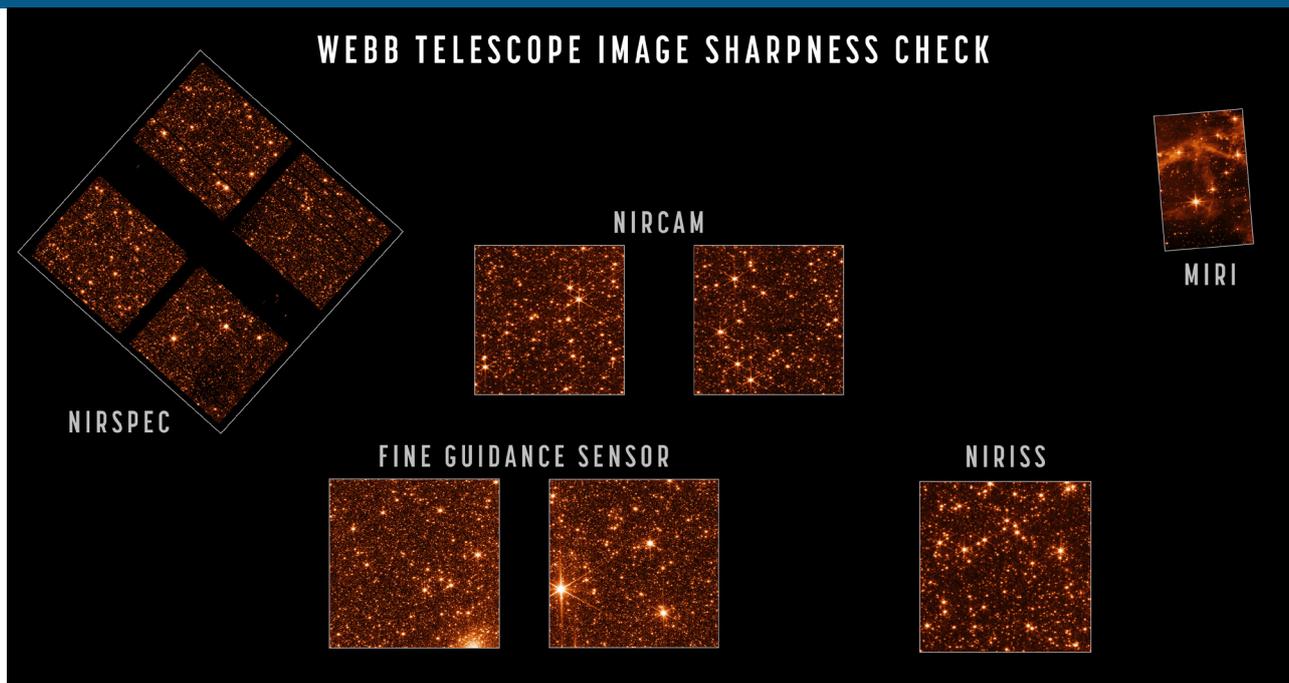


Figura 10. Imagen tomada para evaluar la calidad de imagen de los instrumentos de Webb. La distribución es equivalente al campo de visión del telescopio. Crédito: NASA/STScI.

Esta imagen, todavía borrosa y fuera de foco, marcó el inicio de un proceso iterativo que combina el movimiento de los segmentos con ligeros ajustes en el foco del espejo secundario, hasta conseguir que las 18 imágenes converjan en una sola. Una vez las 18 estrellas están bien alineadas, el siguiente paso es conseguir que los espejos trabajen en fase. El proceso se basa en el análisis de los patrones de interferencia observados en los espectros de 20 pares de segmentos, que varían dependiendo de la diferencia de pistón entre dichos segmentos. Finalmente, los errores residuales en el alineamiento son evaluados y corregidos jugando ligeramente con el enfocado de las imágenes utilizando elementos ópticos de NIRCAM. El resultado de este proceso es un telescopio que está perfectamente alineado con NIRCAM, que se encuentra aproximadamente en el centro del campo de visión.

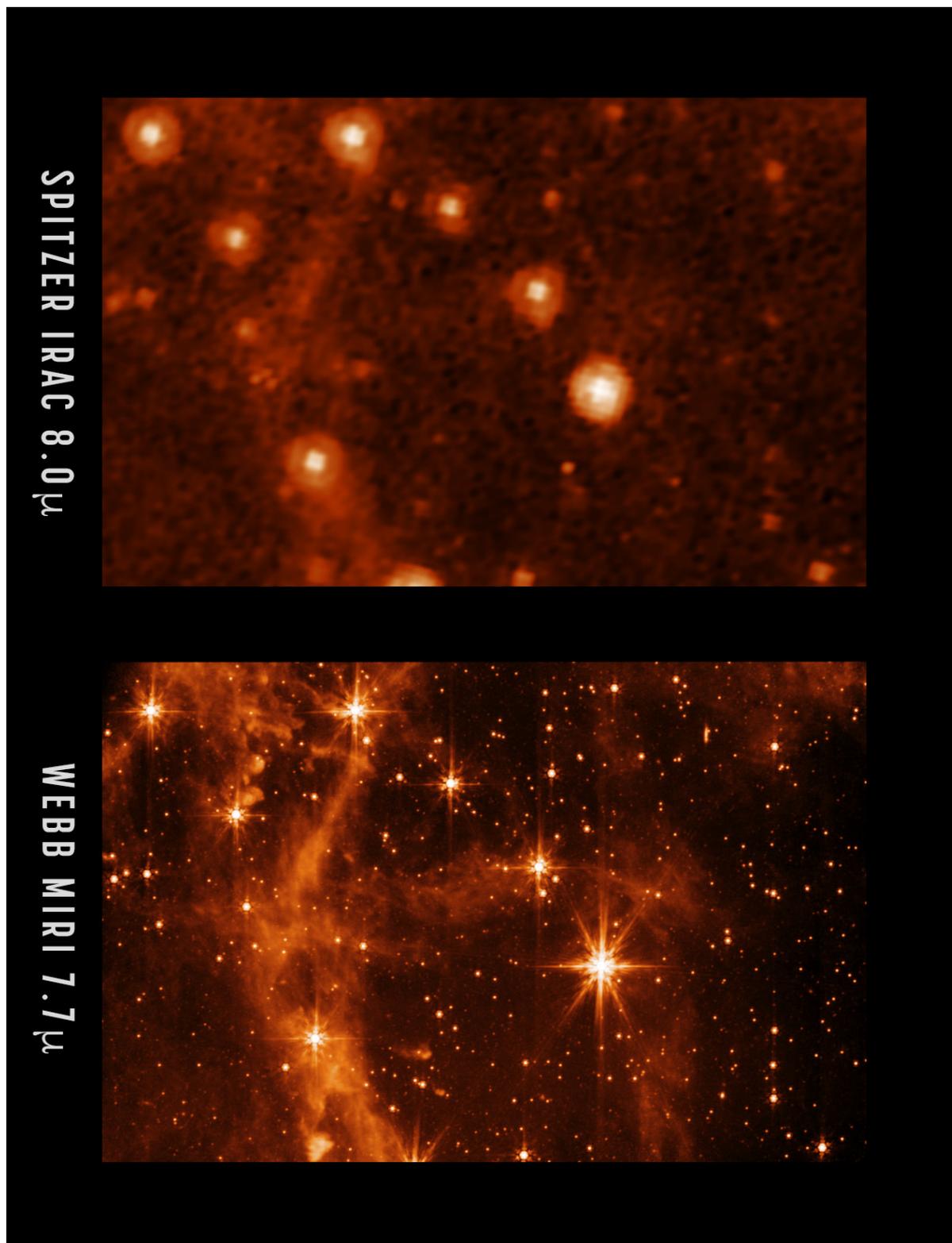
Finalmente, tras tomar datos con el resto de los instrumentos y realizar ligeros ajustes, el 28 de abril de 2022 el proceso de alineamiento se declaró terminado. Como se muestra en la Figura 10, la calidad óptica de todas las imágenes es excelente, más que suficiente para cumplir los objetivos científicos de la misión. Si comparamos imágenes de MIRI con IRAC/Spitzer, la ganancia en resolución espacial y sensibilidad es indiscutible (Figura 11).

Hace semanas que todos los instrumentos alcanzaron su temperatura operacional y están perfectamente enfocados. El resto del periodo de verificación en órbita estará dedicado a los instrumentos. Es necesario caracterizar el comportamiento de los detectores, y determinar la calibración en flujo y longitud de onda. Además, para garantizar la calidad de las observaciones científicas, es imprescindible verificar los procesos de adquisición de objetos, y testear métodos especiales de observación tales como los de objetos del Sistema Solar, que el telescopio debe ser capaz de trazar pese a las altas velocidades relativas.

La publicación de los EROs (Early Release Observations), un conjunto de observaciones planeadas para demostrar al público y la comunidad científica el potencial científico del telescopio Webb, marcará el final del periodo de verificación y el inicio de las operaciones científicas rutinarias. Toda la comunidad científica tendrá acceso a datos de Webb; los programas de ERS (Early Release Science) son de libre acceso, y muchos datos del periodo de verificación se harán públicos cuando comience el Ciclo 1. Sigue las últimas novedades de Webb en el blog de NASA en la página de la ESA.

Agradecimientos: Muchas gracias a Javier Álvarez Márquez, por leer la primera versión de este artículo y proporcionar valiosos comentarios.

Figura 11. Esta imagen compara las diferencias en resolución espacial entre IRAC/Spitzer y Webb/MIRI. Crédito: NASA/JPL-Caltech (izquierda), NASA/ESA/CSA/STScI (derecha).



MAAT, LA NUEVA UNIDAD DE CAMPO INTEGRAL

Una nueva unidad de campo integral (IFU), llamada MAAT, permitirá que el espectrógrafo OSIRIS instalado en el Gran Telescopio CANARIAS (GTC) disponga de la capacidad de realizar espectroscopía 3D con un campo de visión de $12.0'' \times 8.5''$ y una resolución de $0.303'' \times 0.127''$. MAAT mejorará 1.6 veces la resolución espectral de OSIRIS en comparación con su rendija larga de anchura $0.6''$. Todos los grismas y VPH de OSIRIS estarán disponibles para proporcionar una amplia cobertura espectral, con resolución desde $R = 600$ hasta $R = 4100$, en el rango de longitud de onda de 360-1000 nm.



Carlos Domínguez
Enrique Pérez
Francisco Prada
f.prada@csic.es

Instituto de Astrofísica de Andalucía

David Jones
Eduardo Martín

Instituto de Astrofísica de Canarias

M. Ángeles Pérez-García
Universidad de Salamanca

Y la Colaboración MAAT

Los requerimientos científicos de MAAT proporcionarán unas capacidades únicas de observación garantizando su utilidad para la comunidad astronómica española del GTC, abarcando una amplia variedad de temas científicos que cubren toda la astronomía. MAAT también desempeñará un papel fundamental en sinergia con otras instalaciones ubicadas en todo el mundo, algunas de las cuales operan en el Observatorio del Roque de Los Muchachos (ORM) en la isla de La Palma. Se puede encontrar una descripción completa y detallada en el [Libro Blanco de MAAT](#) (ver el video de [presentación de MAAT](#)). En agosto del 2020 el Comité de Seguimiento y Usuarios de GTC recomendó la construcción de MAAT (Micro-slicer Array for Astronomical Transients). MAAT adopta la [política de instrumentos visitantes de GTC](#), y se ofrecerá a toda la comunidad del GTC.

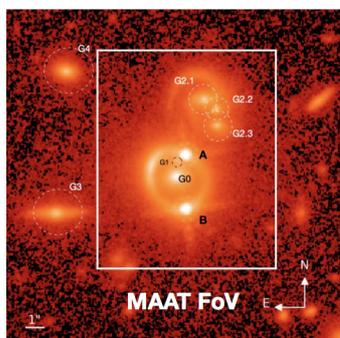
El espectrógrafo OSIRIS es, con diferencia, el instrumento más demandado del GTC. Aproximadamente el 40% del tiempo (~ 700 horas por año) se asignan a la observación de propuestas para utilizar el modo de rendija larga de OSIRIS. El objetivo de MAAT en OSIRIS es añadir el modo de espectroscopía de campo integral, proporcionando un mejor rendimiento que el modo de rendija larga. Más del 90% de los objetos observados con OSIRIS en el modo de rendija larga son fuentes puntuales. Por lo tanto, MAAT será utilizado potencialmente por un gran número de astrónomos y podría convertirse en el modo espectroscópico más utilizado en el GTC. MAAT es un sistema óptico modular que se insertará en el cargador de máscaras del espectrógrafo OSIRIS; y estará disponible en cualquier momento para su uso por parte de la comunidad astronómica del GTC. El diseño óptico propuesto para MAAT se basa en el concepto de *Advanced Image Slicer* (AIS) desarrollado por nuestro colaborador Robert Content del AAO-MQ (Content 1998, SPIE 3354), que ha diseñado los IFUs de MUSE y KMOS en el VLT, y NIRSpec en el JWST.

Las dimensiones e interfaces de MAAT se han tenido en cuenta para garantizar que todo el sistema óptico y envolvente encajen bien en el espacio disponible dentro del cargador de máscaras de OSIRIS. El módulo MAAT que contiene la óptica del IFU se coloca en el plano focal de entrada de OSIRIS (ver video), de forma similar al módulo IFU en el espectrógrafo GMOS de Gemini (Allington-Smith, Content et al. 2000, SPIE, 4008).



Figura 1. Cargador de máscaras de OSIRIS donde se inserta MAAT.

Tabla 1. Parámetros básicos de MAAT junto con una imagen de un *lensed quasar* destacando el campo de visión de MAAT.



Lensed quasar SDSS J1206+4332
(Birrer et al. 2019)

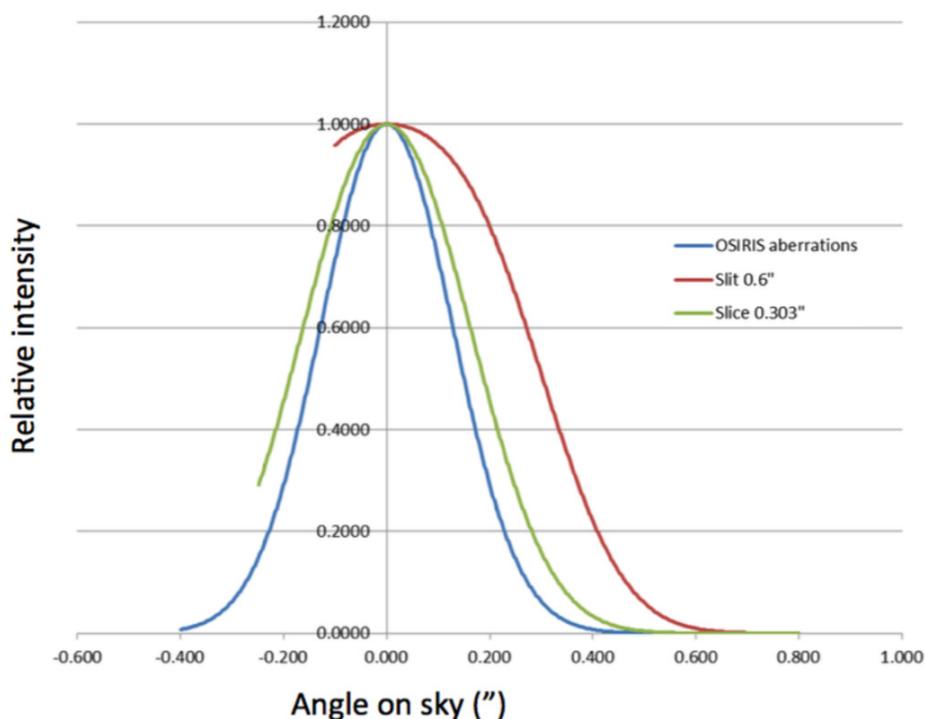
Parameter	Value
Spectrograph	OSIRIS
Module	Integral Field Unit
Field-of-View	12.0'' × 8.5''
Field aspect ratio	1.42
Slice width	0.303''
Spatial sampling	0.303'' × 0.127''
Wavelength range	360 to 1000 nm
Spectral resolution	600 to 4100
Detector	4k × 4k (15 μm pixel)
CCD plate scale	0.127'' per pixel

ID	λ_c (Å)	$\Delta\lambda$ (Å)	D (Å/pix)	R (LS ¹)	Peak Efficiency	Type
R300B	4405	3600-7200	2.60	575 (360)	70%	Grism
R300R	6635	4800-10000	4.02	560 (348)	70%	Grism
R500B	4745	3600-7200	1.87	860 (537)	68%	Grism
R500R	7165	4800-10000	2.58	940 (587)	67%	Grism
R1000B	5455	3630-7500	1.13	1630 (1018)	65%	Grism
R1000R	7430	5100-10000	1.40	1795 (1122)	65%	Grism
R2000B	4755	3950-5700	0.46	3465 (2165)	87%	VPH
R2500U	3975	3440-4610	0.33	4090 (2555)	70%	VPH
R2500V	5185	4500-6000	0.44	4025 (2515)	80%	VPH
R2500R	6560	5575-7685	1.56	3960 (2475)	80%	VPH
R2500I	8650	7330-10000	1.73	4005 (2503)	80%	VPH

¹Resolving power for the OSIRIS 0.6'' long-slit (LS) mode.

Tabla 2. Resoluciones y rangos espectrales disponibles con MAAT+OSIRIS.

Figura 2. PSF de OSIRIS para el *slice* de MAAT comparada con la de la rendija.



La IFU de MAAT está basada en un sistema rebanador de imágenes (*image slicer*) con 28 segmentos que cubren cada uno un campo de $0,303'' \times 12''$. La imagen 2D se reorganiza como una pseudo-rendija de 6 minutos de arco de longitud. Esta pseudo-rendija constituye la rendija vista por el espectrógrafo OSIRIS. El muestreo espacial de $0,303'' \times 0,127''$ garantiza un muestreo adecuado del seeing típico de $0.8''$, incluso con $0.303'' \times 0.254''$ para un *binning* del CCD de 1×2 . El ancho de la pseudo-rendija es $0.303''$ y produce un elemento espectral de 3 píxeles, es decir, una resolución 1.6 veces mayor que el ancho de rendija larga estándar de OSIRIS de $0.6''$.

La IFU está formada por los siguientes componentes ópticos: un espejo doblador de recogida de la imagen de entrada, la óptica frontal, el rebanador de imágenes, los espejos de reimaginación y los espejos de la pseudo-rendija. El espejo de recogida de

la imagen de entrada dobla el haz del telescopio hacia la óptica frontal, que crea un plano focal sobre el rebanador de imágenes. El plano focal del telescopio se divide entonces en 28 rebanadas y cada una de ellas se refleja con un ángulo diferente hacia el correspondiente espejo de reimaginación. Consecuentemente hay 28 espejos de reimaginación. Las 28 rebanadas se reorganizan a lo largo de la pseudo-rendija con un espacio entre ellas equivalente a 4 píxeles en el detector, lo que evita interferencias. Los espejos de la pseudo-rendija envían la luz en la dirección correcta hacia el espectrógrafo OSIRIS. En el [Libro Blanco de MAAT](#) se ofrecen más detalles.

Para tener una visión general de cómo serán las imágenes CCD de los datos de MAAT hemos utilizado los cubos de datos de MUSE@VLT de la ESO de algunos objetos representativos y luego los hemos transformado a través de las especificaciones

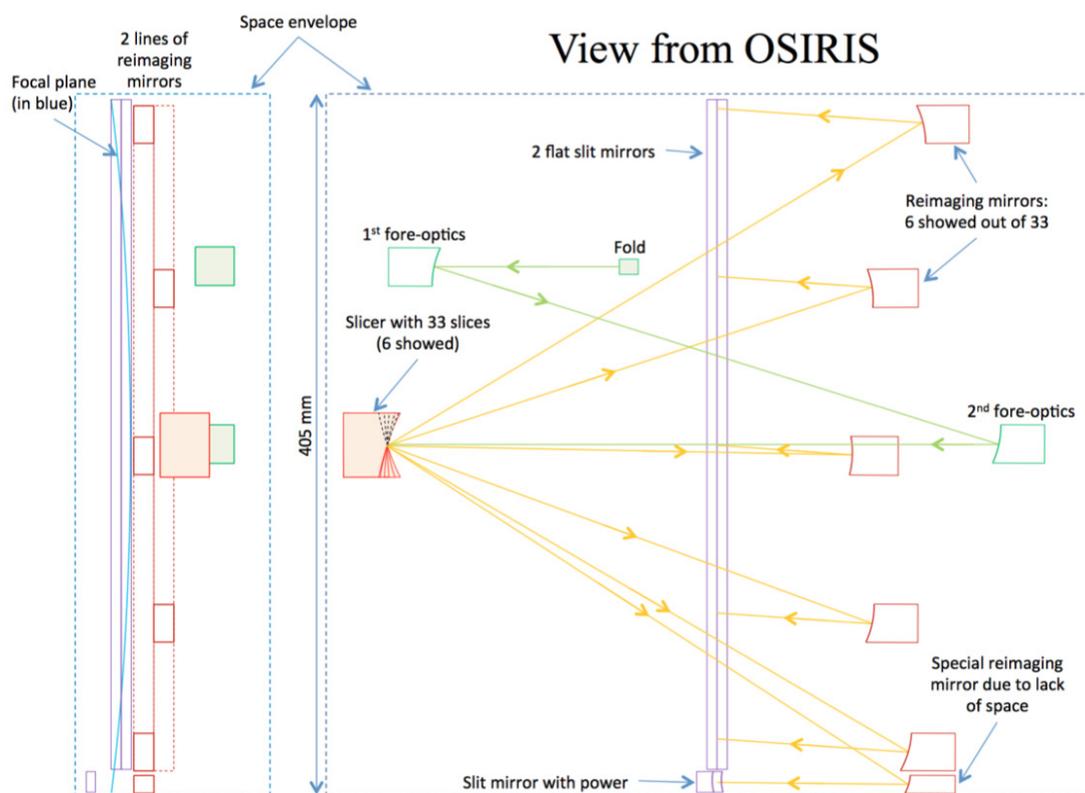


Figura 3. Sketch simplificado con el diseño óptico de la unidad de campo integral de MAAT.

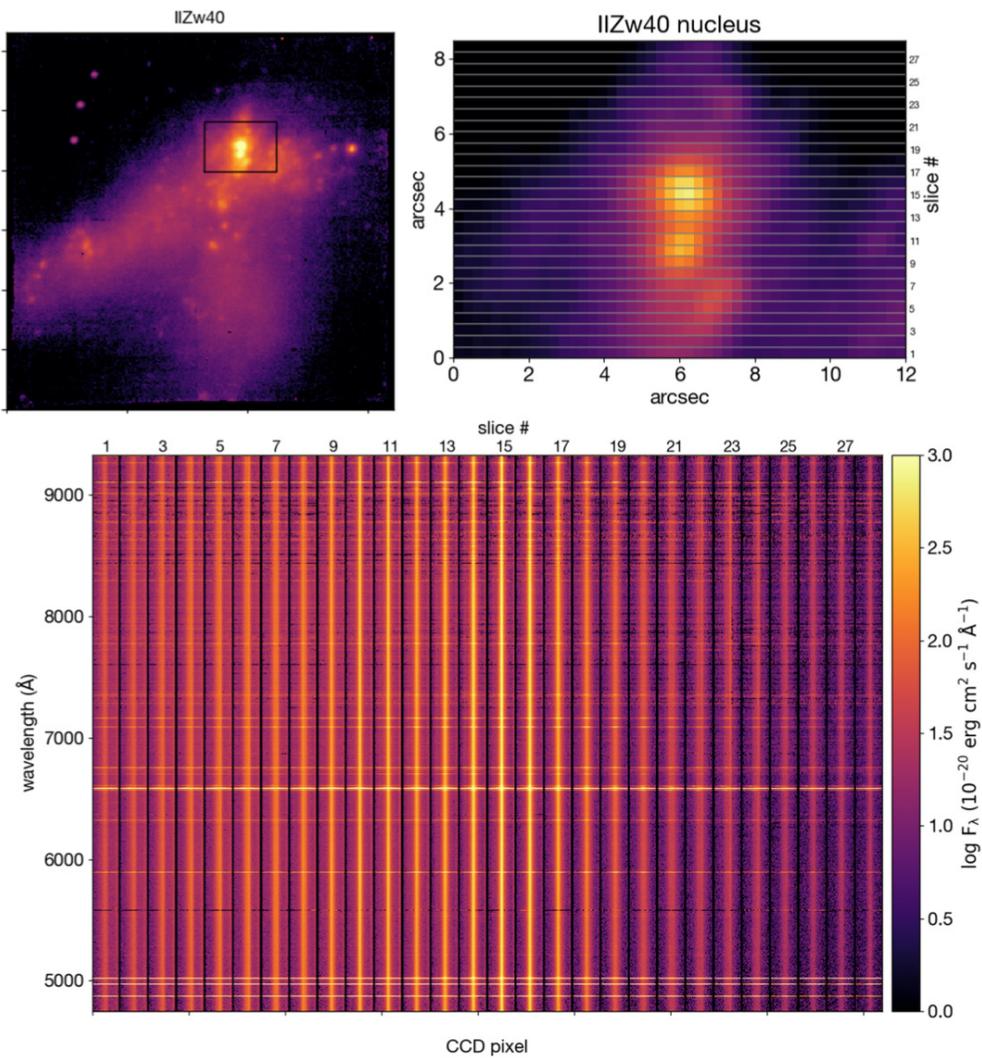


Figura 4. Imagen espectral del núcleo de IIZw40 visto por MAAT@GTC.

instrumentales de OSIRIS+MAAT, adoptando el grisma R1000R. En la figura se muestra como ejemplo una región circunuclear de una galaxia joven, IIZw40, de baja metalicidad (elegida para resaltar el rico espectro de líneas de emisión). El panel superior izquierdo muestra la imagen de MUSE@VLT de IIZw40 con una caja de $12.0'' \times 8.5''$ correspondiente al campo de visión de MAAT centrado en el núcleo. A la derecha, el núcleo IIZw40 visto por MAAT@GTC, con 28 cortes de $0.303''$ cada uno en el eje vertical y $12''$ de $0.254''$ píxeles en el eje horizontal. La luz del IFU es dispersada por OSIRIS para generar una imagen en el detector CCD. Esta imagen

espectral CCD se muestra en la parte inferior, donde la dirección espectral está a lo largo del eje vertical y la dirección de la segmentación espacial a lo largo del eje horizontal (observe que, debido al límite azul de MUSE@VLT, estas simulaciones se cortan en 480 nm). En la dirección del rebanador espacial, el segmento número 1, que corresponde a la parte inferior de la imagen de arriba, está ubicado en el extremo izquierdo del CCD, y todos los segmentos siguen a la derecha, cada uno separado por 4 píxeles del CCD del segmento anterior, por lo que el corte superior en la imagen de arriba se coloca en el extremo derecho del eje horizontal en el CCD.

Las observaciones de rendija larga de una fuente puntual se ven afectadas por la atmósfera al menos de dos maneras: la anchura de la rendija debe adaptarse para que coincida con el seeing (con los consiguientes cambios no deseados en la resolución espectral), y la dispersión atmosférica cromática se desplaza espacialmente y amplía la imagen en función de la longitud de onda (ver más abajo). Ambos inconvenientes afectan a la calidad de los espectros observados y tienen impacto en el tiempo de observación. La espectroscopía de campo integral registra simultáneamente información espectral y espacial completa de la fuente, un cubo de datos, que permite corregir la refracción atmosférica cromática. En consecuencia, básicamente no se necesita la fase de adquisición del objeto para obtener datos espectroscópicos de alta calidad. Las pérdidas de luz y el sesgo espectral están relacionados con el “efecto de rendija”, que se produce cuando la rendija se ilumina de forma asimétrica (Bacon et al. 1995, A&AS, 113, 347). Además, a partir del cubo de datos es posible obtener imágenes a longitud de onda constante. Esto permite realizar espectro-astrometría, una técnica para estudiar la estructura y la cinemática de una fuente astronómica en escalas mucho más pequeñas que el límite de difracción del telescopio (Arribas, Mediavilla et al., 1999, A&AS, 136, 189).

MAAT@OSIRIS ofrece todas estas ventajas, entre otras, lo que proporcionará a la comunidad GTC capacidades de observación únicas, que enumeramos a continuación,

1 MAAT@OSIRIS proporciona espectroscopía de campo integral de banda ancha con una resolución espectral baja/moderada,

- 2 MAAT no adolece de pérdidas de luz (fuentes puntuales o extensas dentro del campo de visión), lo que representa una gran ventaja en comparación con el modo de rendija larga de OSIRIS. Esto permite tener una mayor eficiencia con MAAT, mejorando así la relación Señal a Ruido,
- 3 Permitirá realizar calibración absoluta de flujo y espectro-astrometría,
- 4 Mejorará un factor 1.6 la resolución espectral de OSIRIS,
- 5 Permitirá realizar espectroscopía de campo integral en el UV con alta eficiencia,
- 6 Para cualquier valor del seeing, MAAT mantiene su resolución espectral nominal independientemente de las condiciones de observación,
- 7 Ahorro de tiempo en la adquisición de los objetos. La imagen completa del campo de visión a partir del cubo de datos 3D confirmará la identificación del objeto, y al mismo tiempo garantizará las observaciones de los objetos cuya posición se conoce con una precisión de unos pocos segundos de arco. Esto representa otra ventaja, en particular para la astrofísica de objetos transitorios.

En términos de oportunidad, entre todos los IFUs basados en un rebanador de imagen (*mirror slicer*), limitados por seeing, existentes en telescopios de clase 10 m, MAAT proporciona la capacidad única de una cobertura espectral de banda ancha en todo el rango espectral desde el UV hasta el IR cercano (360–1000 nm). Hay que tener en cuenta que MUSE@VLT es ciego por debajo de 480 nm y KCWI@Keck aún no tiene un brazo rojo.

Destacamos que no hay un instrumento equivalente en el GTC que pueda proporcionar las caracte-

Tabla 3. Comparativa de MAAT con otros IFUs basados en un rebanador de imagen (*mirror slicer*), limitados por seeing, existentes en telescopios de clase 10 m.

Sky	Telescope	Instrument	Spectral range	Resolution	Field of View	Spatial sampling	IFU
Southern	VLT	MUSE	480–930 nm	1770–3590	59.9" × 60.0"	0.2" × 0.2"	mirror slicer
Northern	Keck	KCWI	350–560 nm	3000–4000	8.25" × 20.0"	0.34" × 0.147"	mirror slicer
Northern	GTC	MAAT	360–1000 nm	600–4100	12.0" × 8.5"	0.303" × 0.127"	mirror slicer

rísticas de observación de MAAT. Cabe mencionar que MEGARA en el GTC con un IFU alimentado por fibras es complementario a MAAT dada su mayor resolución espectral.

MAAT aprovechará el aumento significativo en la eficiencia de OSIRIS gracias a su nuevo detector e2v de 4k×4k, y [la reubicación de OSIRIS en el foco Cassegrain del GTC](#). Las capacidades únicas de observación de MAAT ampliarán las oportunidades de la comunidad astronómica del GTC para revelar la naturaleza de los fenómenos más sorprendentes del universo. El GTC equipado con OSIRIS+MAAT también jugará un papel fundamental en sinergia con otras instalaciones que operan en La Palma, abriendo una nueva era para los estudios de objetos transitorios. Además, los requisitos de MAAT permiten cubrir las necesidades de la comunidad española de GTC en una

amplia gama de temas científicos dadas sus capacidades únicas de observación.

Si bien el potencial científico de MAAT@GTC es esencialmente ilimitado, aquí nos enfocamos en un conjunto de temas científicos destacados por el equipo de MAAT que resumimos a continuación,

- La naturaleza del universo difuso: el medio intergaláctico y circungaláctico,
- Lentes gravitacionales,
- Cosmografía con cuásares y supernovas,
- Identificación y caracterización de contrapartes electromagnéticas de ondas gravitatorias (GW),
- Exploración del entorno de la galaxia anfitriona de las supernovas,
- Estrellas binarias y abundancias de nebulosas,
- Enanas marrones y objetos de masa planetaria,
- Sinergias con telescopios de todo el mundo y otras instalaciones en La Palma.

Figura 5. Instalaciones operativas durante esta década que tienen sinergia con MAAT.

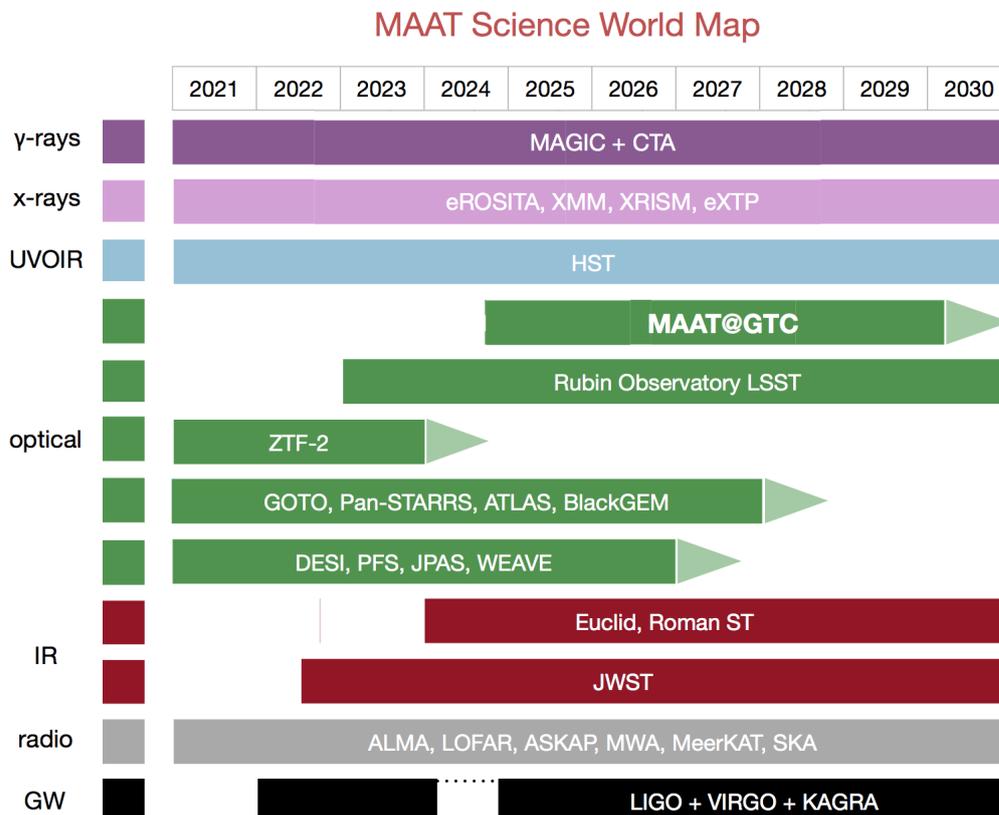
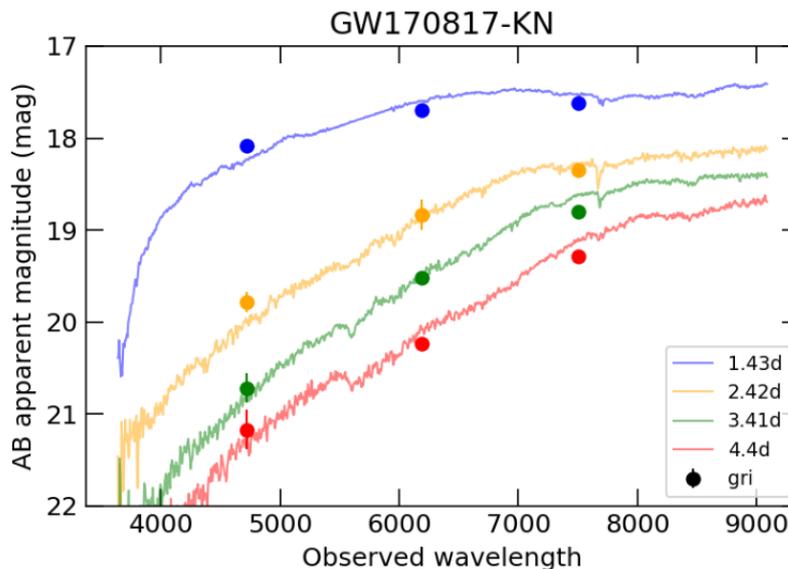


Figura 6. Serie temporal de los espectros de la Kilonova GW170817 si hubiera sido observada con MAAT+OSIRIS con las redes R1000B y R1000R y 30 minutos por época.



Mirando al futuro, podemos identificar nuevas y emocionantes vías en las que se pueden esperar avances científicos, muchos de los cuales también involucran objetos transitorios. Para empezar, acabamos de presenciar el amanecer de la era de la astronomía multi-mensajero. Las fusiones de objetos binarios compactos, que generan señales de GW junto con ondas electromagnéticas (y posiblemente neutrinos), nos permiten sondear los estados más densos de la materia y sirven como laboratorios para la gravedad en sus condiciones más extremas. En la banda visible, el fenómeno resultante, denominado Kilonova, es muy prometedor para la exploración científica que va desde el origen de los elementos pesados, a través de las reacciones del proceso r, hasta los estudios más precisos de la expansión del universo (ver nuestro trabajo reciente sobre el estudio de la ecuación de estado y la constante de Hubble a partir de las observaciones de Kilonovas con MAAT, [Pérez-García et al. 2020](#)).

Las lentes gravitacionales ofrecen otra forma de estudiar el poder de la gravedad y las propiedades del espacio-tiempo curvo, rastreando así la naturaleza y distribución de la materia oscura y la energía oscura de forma independiente. Las lentes gravitatorias en objetos transitorios, sobre todo cuásares y supernovas, está emergiendo como una nueva herramienta de precisión en astronomía: además de la información espacial, estas balizas de luz

estructuradas en el tiempo nos permiten medir los retrasos entre los rayos de luz desviados por la gravedad de los objetos en la línea de visión. Estos deflectores tienen muchas formas y escalas de masa diferentes: agujeros negros, estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias. Las lentes gravitacionales ofrecen formas únicas de estudiar estas estructuras, junto con la medición de parámetros cosmológicos globales, sobre todo la constante de Hubble.

Estos fenómenos transitorios intrínsecamente muy raros pueden detectarse ahora mediante estudios de imágenes a gran escala en longitudes de onda ópticas que escanean los cielos con una velocidad y eficiencia sin precedentes. Proyectos como ZTF, que pronto se convertirá en ZTF-2, Pan-STARRS, GOTO, ATLAS, BlackGEM, y pronto LSST en 2024, descubrirán el cielo variable de maneras que no han sido posibles hasta ahora. Es en este contexto donde MAAT@GTC se convierte en el elemento crítico que falta. Si bien los estudios con imágenes son esenciales para el descubrimiento de objetos transitorios raros, la identificación de su naturaleza y sus entornos galácticos anfitriones requiere una detección espectroscópica con un telescopio de clase 10 m. Por lo tanto MAAT, la unidad de espectroscopía de campo integral para OSIRIS en el Gran Telescopio CANARIAS de 10.4 m, nos presenta oportunidades únicas para completar la revolución del dominio del tiempo en astronomía.

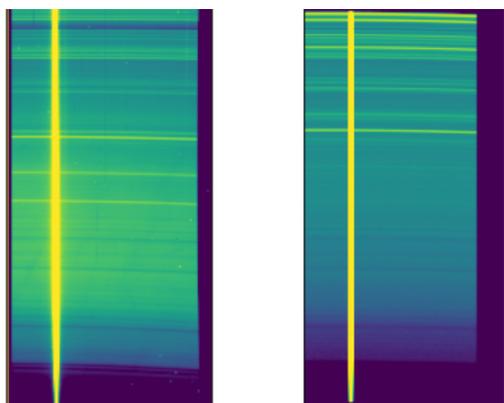
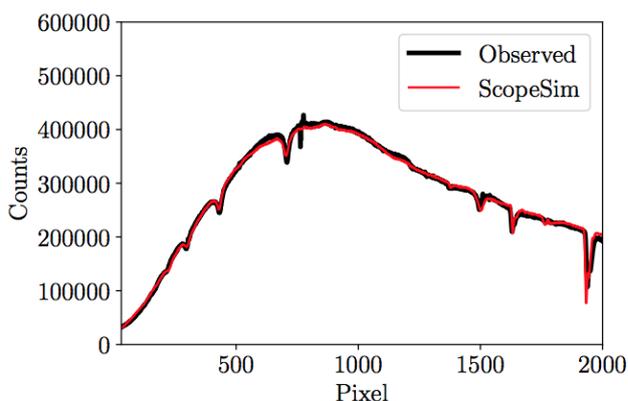


Figura 7. Simulación de la observación de la estrella estándar G191-B2B con el modo long-slit de OSIRIS con una anchura de 2.52" y la red R1000B. ScopeSim reproduce bien las observaciones.

El paquete de reducción de datos de MAAT es parte del desarrollo del instrumento, y se hará público a la comunidad GTC para reducir los datos obtenidos de sus observaciones. El objetivo es que el proceso sea lo más automático posible, asegurando así una entrega fluida y consistente de cubos de datos reducidos y calibrados, listos para el análisis científico. Esta es la clave para el éxito de MAAT. También proporcionaremos una versión de vista rápida con funciones básicas para ser utilizadas por los astrónomos durante la observación. Para ello estamos utilizando [Pypelt](#) (Prochaska et al. 2020, JOSS, 5, 2308). Pypelt es un paquete de Python diseñado para reducir datos espectroscópicos. Pypelt está bien documentado en línea y tiene un canal Slack para desarrolladores y otro canal para ayuda al usuario. Los algoritmos empleados en Pypelt se basan en décadas de desarrollo de paquetes de reducción. Es fácilmente extensible a otros telescopios y espectrógrafos, y actualmente admite más de 25 espectrógrafos en varias etapas de desarrollo. Pypelt es compatible con la reducción semiautomática de datos de campo integral, como los adquiridos con Keck Cosmic Web Imager (KCWI). La persona que implementó la reducción de KCWI en Pypelt (Ryan Cooke de la Universidad de Durham) es miembro de MAAT y responsable del desarrollo del paquete de reducción de datos de MAAT. Otro beneficio de usar Pypelt es el esfuerzo de la comunidad involucrada; las actualizaciones a los algoritmos en el proceso de reducción mejorarán los productos de datos de todos los espectrógrafos compatibles. Nuestro colaborador David Jones en el IAC ha implementado la



reducción de datos de rendija larga y multi-objeto de OSIRIS con Pypelt (versión 1.4.0 lanzada el 23 de abril de 2021). Recientemente hemos actualizado una [nueva versión 1.9.0](#). Este ya es un paso importante para el desarrollo del paquete de reducción para MAAT.

Por otra parte estamos desarrollando las simulaciones de MAAT utilizando [ScopeSim](#), en colaboración con Kieran Leschinski de la Universidad de Viena, lo que nos permitirá validar el desarrollo del paquete de reducción de datos y verificar el desempeño de las ca-

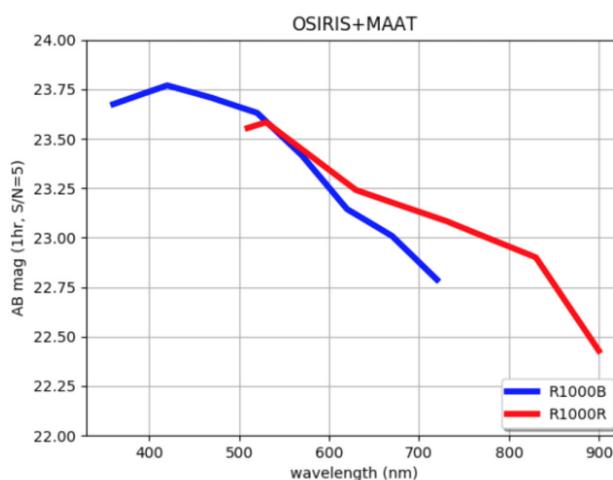


Figura 8. Magnitud límite de MAAT+OSIRIS con las redes R1000B y R1000R para 1 hora y S/N=5.

racterísticas instrumentales y requerimientos científicos de MAAT. Como primer paso, hemos implementado el modo de rendija larga de OSIRIS en ScopeSim, dando la oportunidad de simular observaciones correspondientes a datos ya obtenidos y confirmar su correcto funcionamiento. La simulación de la observación de la estrella estándar G191-B2B con el modo long-slit de OSIRIS con una anchura de 2.52" y la red R1000B; demuestra que ScopeSim reproduce bien las observaciones y su potencial para proveer datos simulados para el desarrollo del paquete de reducción de MAAT - esto asegurará que no hay retrasos entre la obtención de los primeros datos con el instrumento y la entrega de los datos reducidos listos para su análisis científico.

Hemos construido una herramienta para generar datos espectrofotométricos realistas con MAAT. La entrada de la herramienta consta de plantillas para modelar el flujo teórico de la fuente de interés y la información relevante para la calculadora de tiempo de exposición (ETC). La ETC proporciona la relación señal/ruido (S/N, o el tiempo de exposición) en función de la longitud de onda para un tiempo de exposición dado (o S/N), teniendo en cuenta la transmisión a través de la atmósfera y la óptica del telescopio y del instrumento (MAAT+OSIRIS). Funciona para todo el conjunto de grismas de OSIRIS y para objetos puntuales y extensos. La salida de la ETC incluye los espectros simulados observados en unidades físicas ($\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{\AA}$). [El código Python y las instrucciones de la ETC](#) están disponibles en la página web de MAAT.

La [Colaboración MAAT](#) está integrada por astrónomos e ingenieros de cuatro institutos en España (Instituto de Astrofísica de Andalucía, Instituto de Astrofísica de Canarias), Dinamarca (DARK, Universidad de Copenhague) y Suecia (Oskar Klein Center, Universidad de Estocolmo), e investigadores asociados de la Universidad de Salamanca y la Universidad de Durham. El presupuesto total de MAAT es de 1.3 M€ y cuenta con la financiación necesaria para su construcción gracias a la contribuciones de las instituciones miembros de la Colaboración (ver [organigrama](#) con la gestión del proyecto). MAAT ha superado con éxito la fase de diseño preliminar este mes de abril de 2022, y esperamos que esté instalado en el GTC para finales de 2024. Desde aquí queremos agradecer la inestimable ayuda y soporte del personal de Grantecan, y del grupo de ingeniería que construyó OSIRIS.

Mosaico con los autores del artículo. De izquierda a derecha y de arriba a abajo, Francisco Prada, M^a Ángeles Pérez-García, Carlos Domínguez, Eduardo Martín, David Jones y Enrique Pérez.



EAGLE: SIMULACIONES COSMOLÓGICAS

El pasado 14 de enero, la Royal Astronomical Society anunció los ganadores de los premios de astrofísica y geofísica del 2022. El equipo del proyecto de simulaciones cosmológicas EAGLE (Universidad de Durham, Universidad John Moores de Liverpool y Universidad de Leiden) recibió este prestigioso galardón de astrofísica, motivado por el impacto de sus simulaciones en el campo de la formación y evolución de galaxias. El viaje comenzó hace diecisiete años y aún no ha terminado.

Fotografía: Ana Esteban Gutiérrez



Claudio Dalla Vecchia
Instituto de Astrofísica de Canarias
caius@iac.es

El anuncio de los premios se hizo público en la Reunión Ordinaria de la Royal Astronomical Society (RAS) celebrada el viernes 14 de enero de 2022. El premio más prestigioso es la Medalla de Oro, otorgada por primera vez en 1824. Los ganadores anteriores incluyen a Albert Einstein, Edwin Hubble, Arthur Eddington y Stephen Hawking. El ganador de este año ha sido George Efstathiou, uno de los padres del modelo cosmológico Λ -CDM y pionero de las simulaciones por ordenador de la estructura a gran escala del universo. Se han otorgado otros premios individuales a investigadores destacados en el campo de la astrofísica y la geofísica¹.

El equipo del proyecto EAGLE recibió el premio grupal en astrofísica con la siguiente motivación²:

EAGLE (Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments) is a suite of cosmological gas-dynamical simulations that follow the formation and evolution of over 10,000 galaxies in a representative volume of a Λ -CDM universe. EAGLE's flagship simulations were the first to yield a population of galaxies whose properties closely resemble those of real-world counterparts.

The impact of the simulations is demonstrated by the impressive citation rates of the reference papers (including the second most-highly cited MNRAS paper for the decade 2010–2019), and the large number of papers and spin-off projects that have made direct use of the results. Studies based on EAGLE data have explored areas including (but not limited to) the growth of galaxies, black holes, and cosmic large-scale structure; the origin of the Hubble sequence; the relationship between galaxies and the gaseous cosmos; predictions for gravitational-wave events; and both direct and indirect dark-matter detection experiments.

The project has also had notable impact outside academia. Visualisations of EAGLE results were featured in the IMAX feature film Voyage of Time, and at the UK's Lumiere festival in both 2015 and 2017 (~200,000 visitors). EAGLE was the centrepiece of the popular Galaxy Makers interactive exhibit at the 2016 Royal Society Summer Science Exhibition (~15,000 visitors), an adapted version of which, titled "Your place in the Universe", features in the 2021 online version of the Exhibition.

For these reasons, the EAGLE team is awarded the Group Achievement award in Astronomy.

El premio llega después de casi dos décadas de trabajo en el campo de la astrofísica numérica de un grupo de investigadores que forman parte del *VIRGO Consortium for Cosmological Supercomputer Simulations*³.

EL PRINCIPIO

En 2005, me uní, con un contrato postdoctoral, al grupo liderado por Joop Schaye en el Observatorio de Leiden en los Países Bajos. Fui parte de un pequeño grupo de investigadores dentro del Consorcio VIRGO que inició el desarrollo del proyecto *Overwhelmingly Large Simulation* (Simulación abrumadoramente grande, OWLS por sus siglas en inglés), un ambicioso proyecto para estudiar el medio intergaláctico en un volumen cosmológico que forma galaxias.

Sobre la base de lo que se consideraba lo más avanzado en modelado numérico en ese momento, la colaboración diseñó y mejoró algoritmos para simular los procesos físicos más relevantes que dan forma a las galaxias. Estos fueron los modelos para formación estelar⁴, enfriamiento de gas⁵, evolución estelar⁶ y retroalimentación⁷, y crecimiento y retroalimentación de agujeros negros⁸. En particular, el tratamiento del enfriamiento del gas tuvo en cuenta el efecto del fondo ultravioleta sobre la temperatura de equilibrio del medio intergaláctico, hasta entonces despreciado, y el efecto de la abundancia relativa de elementos pesados sobre la forma de la función de enfriamiento del gas, hasta entonces calibrada a las abundancias solares.

El proyecto aprovechó el superordenador de la colaboración LOFAR, el IBM Blue Gene/L instalado en los Países Bajos para procesar el flujo continuo de señales de radio de antenas repartidas por los Países Bajos y Europa. Como la instalación de las antenas se retrasó, la colaboración tuvo acceso a un tiempo de cómputo considerable. Se ejecutaron más de sesenta variaciones del modelo, lo que proporcionó la visión más profunda en ese momento de la interacción de los procesos físicos que dan forma a la historia de formación estelar del universo⁹. A lo largo de los años, se publicaron más de cien artículos científicos que utilizan los datos de estas simulaciones. OWLS elevó el estándar de las simulaciones cosmológicas e hidrodinámicas, y todos los proyectos numéricos posteriores tuvieron que adaptarse. Además, la exploración del espacio de parámetros ya no es-

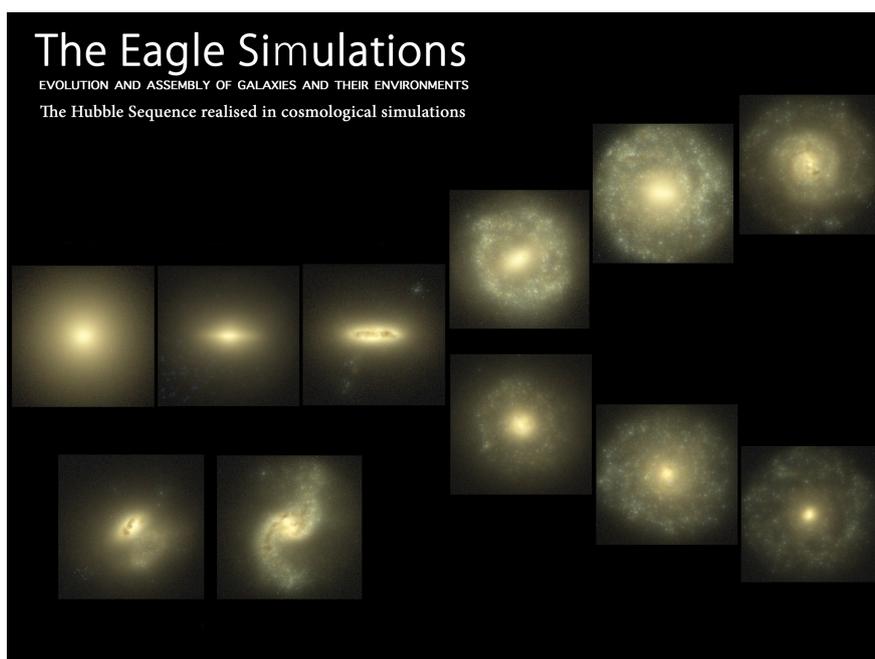
taba restringida al modelado semianalítico, con la ventaja de la información temporal y dinámica inherente a las simulaciones cosmológicas.

EAGLE

Poco después de publicar el primer artículo de OWLS, el equipo comenzó el desarrollo del proyecto *Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments* (Evolución y ensamblaje de galaxias y sus entornos, EAGLE por su signa en inglés). Los conocimientos adquiridos sobre el modelado de la historia de la formación estelar del universo se emplearon para diseñar la primera simulación que podía reproducir la función de masa estelar de las galaxias a $z=0$. Se trataba de calibrar la retroalimentación de agujeros negros y estrellas para regular la formación estelar en galaxias masivas y de baja masa, respectivamente, junto con controlar la estabilidad numérica cuando se inyectaba energía. Con este fin, la falta de conservación de la energía de retroalimentación debido a una integración temporal deficiente estaba sesgando cualquier prueba de calibración¹⁰. Por último, pero no menos importante, fue la actualización del algoritmo de hidrodinámica para mejor tratar las discontinuidades de contacto y favorecer la mezcla de fases gaseosas en el medio interestelar e intergaláctico¹¹.

Hacer coincidir la función de masa estelar de la galaxia fue más fácil de lo esperado. También fue más degenerado de lo esperado, siendo la función de masa cercana a la observada independientemente del modelo de retroalimentación estelar empleado¹². ¿Qué más se necesitaba para romper la degeneración? Las galaxias simuladas tenían la masa correcta con respecto al halo de materia oscura en el que vivían, pero su tamaño, medido cómo el radio que contiene la mitad de la masa estelar, fluctuaba en gran medida al cambiar el modelo de retroalimentación estelar. Luego se agregó el tamaño de las galaxias a la calibración.

Se cree que la formación estelar en galaxias masivas y gigantes está regulada por la actividad de sus agujeros negros supermasivos centrales. Aún se desconoce en gran medida cómo la producción de energía de estos agujeros negros se acopla con el medio intergaláctico y el medio intra-cúmulo. Sin embargo, la correlación entre la masa del agujero negro y la masa estelar o la dispersión de la velocidad estelar es bien conocida por observación¹³. Este fue el tercer y último elemento de calibración.



Una selección de galaxias simuladas en la simulación de EAGLE ordenadas por tipo morfológico. Las galaxias simuladas reproducen la variedad de morfologías observadas y representadas por el diagrama de Hubble.

El primer análisis de los datos simulados demostró la eficacia del modelo. No sólo se reprodujeron propiedades de galaxias en $z = 0$ que no habían sido objeto de calibración, sino que se obtuvo la correcta evolución de las relaciones observadas a lo largo de la historia del universo¹⁴.

Debido a la resolución espacial y temporal finita de las simulaciones cosmológicas, los modelos numéricos para los procesos físicos a menudo simulan el comportamiento macroscópico de la física no resuelta subyacente. Los modelos se adaptan a una gama de resoluciones donde son aplicables. Fuera de ese rango, el modelo ya no representa un comportamiento macroscópico o pierde procesos físicos adicionales que son relevantes en esa resolución. Incluso dentro del rango permitido, los modelos numéricos no convergen en una solución al aumentar la precisión del cálculo, es decir, la resolución de la simulación. Esto se debe al comportamiento altamente no lineal de los procesos físicos como, por ejemplo, el enfriamiento del gas. En términos prácticos, los parámetros numéricos establecidos para calibrar la simulación en alguna resolución no son una buena opción en una resolución diferente. Al cambiar la resolución se tiene que recalibrar el modelo para alcanzar continuidad con los resultados previos. Este ha sido el cambio radical de

metodología y filosofía introducido por EAGLE. Afortunadamente, sólo se necesita variar un par de parámetros numéricos para ajustar la retroalimentación y reproducir los resultados a una resolución diferente¹⁵.

El primer artículo de EAGLE, publicado en 2015, ha recogido más de 2100 citas hasta la fecha, siendo uno de los artículos más citados de la última década. Más de 200 trabajos científicos publicados han hecho uso de los datos de simulaciones de EAGLE, y varios proyectos derivados se han sumado^{16, 17}.

EL FUTURO

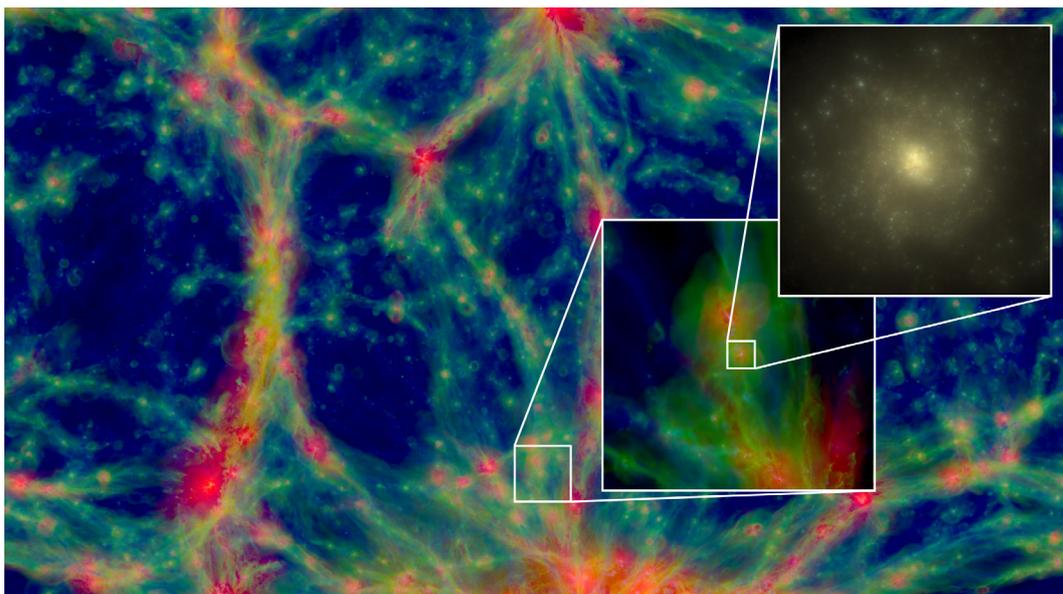
El proyecto EAGLE ha proporcionado simulaciones cosmológicas realistas que ampliaron nuestra comprensión de la formación y evolución de las galaxias. Sin embargo, solo rascó la superficie de lo que será el siguiente paso: describir la estructura interna de centenares de galaxias (la naturaleza multifásica del medio interestelar, discos y barras estelares, etc.) dentro de una gran simulación cosmológica. Esto se intentará con el próximo proyecto, COLIBRE, y será el resultado de más de cinco años de desarrollo.

El premio de la RAS se otorgará oficialmente al equipo EAGLE en la Reunión Nacional de Astronomía del Reino Unido en Warwick el 14 de julio

NOTAS

- ¹ Los premios de geofísica se otorgaron por primera vez en 1964.
- ² [https://ras.ac.uk/sites/default/files/RAS_Group_Award_\(A\)_-El_equipo_EAGLE.pdf](https://ras.ac.uk/sites/default/files/RAS_Group_Award_(A)_-El_equipo_EAGLE.pdf)
- ³ <https://virgo.dur.ac.uk/>
- ⁴ Schaye & Dalla Vecchia 2008, On the relation between the Schmidt and Kennicutt-Schmidt star formation laws and its implications for numerical simulations, MNRAS, 383, 1210.
- ⁵ Wiersma, Schaye, & Smith 2009, The effect of photoionization on the cooling rates of enriched, astrophysical plasmas, MNRAS, 393, 99.
- ⁶ Wiersma et al. 2009, Chemical enrichment in cosmological, smoothed particle hydrodynamics simulations, MNRAS, 399, 574.
- ⁷ Dalla Vecchia & Schaye 2008, Simulating galactic outflows with kinetic supernova feedback, MNRAS, 387, 1431.
- ⁸ Booth & Schaye 2009, Cosmological simulations of the growth of supermassive black holes and feedback from active galactic nuclei: method and tests, MNRAS, 398, 53.
- ⁹ Schaye et al. 2010, The physics driving the cosmic star formation history, MNRAS, 402, 1536.
- ¹⁰ Durier & Dalla Vecchia 2012, Implementation of feedback in smoothed particle hydrodynamics: towards concordance of methods, MNRAS, 419, 465.

- ¹¹ Schaller et al. 2015, The EAGLE simulations of galaxy formation: the importance of the hydrodynamics scheme, MNRAS, 454, 2277.
- ¹² Crain et al. 2015, The EAGLE simulations of galaxy formation: calibration of subgrid physics and model variations, MNRAS, 450, 1937.
- ¹³ Magorrian et al. 1998, The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers, AJ, 115, 2285.
- ¹⁴ Furlong et al. 2015, Evolution of galaxy stellar masses and star formation rates in the EAGLE simulations, MNRAS, 450, 4486.
- ¹⁵ Crain et al. 2015, The EAGLE simulations of galaxy formation: calibration of subgrid physics and model variations, MNRAS, 450, 1937.
- ¹⁶ Schaye et al. 2015, The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments, MNRAS, 446, 521.
- ¹⁷ Barnes et al. 2017, The Cluster-EAGLE project: global properties of simulated clusters with resolved galaxies, MNRAS, 471, 1088.
- ¹⁸ Bahé et al. 2017, The Hydrangea simulations: galaxy formation in and around massive clusters, MNRAS, 470, 4186.



Una región del volumen cosmológico simulado en EAGLE. La densidad del gas está representada por la luminosidad en la imagen mientras el color es su temperatura, de más alta (rojo) a más baja (azul). Los recuadros son aumentos de una porción de la imagen que enseñan el entorno de formación de una galaxia espiral (primer aumento) y la imagen sintética de la galaxia (segundo aumento).

La Ley 14/2011, de 1 de junio, de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, estableció un nuevo marco en el que los Planes Estatales de I+D+I se definen como una herramienta de la Administración General del Estado para la consecución de los objetivos definidos en la Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación (EECTI 2021-2027), un marco de referencia que sirve de instrumento para articular la política en I+D+I a nivel nacional con las políticas de investigación de la Unión Europea y otros Organismos Internacionales. La EECTI 2021-2027 se estructura en dos planes estatales, el PEICT 2021-2023 y PEICT 2024-2027.



Inmaculada Domínguez Aguilera
U. de Granada / Coordinadora AYA
inma@ugr.es



Patricia Sánchez Blázquez
U. Complutense de Madrid / Gestora AYA
patsan17@ucm.es

Nos encontramos en la primera fase (2021-2023), centrada en garantizar y reforzar los programas existentes, definir la carrera investigadora, impulsar la transición ecológica y digital, y apoyar la I+D+I en el ámbito sanitario. La siguiente fase (2024-2027) tendrá como objetivo principal conseguir que la inversión en I+D+I sea la base de una economía inclusiva y sostenible, basada en el conocimiento.

Asimismo, la Estrategia Española de Innovación queda englobada dentro del marco planteado por la Unión Europea en la [Estrategia Europa 2020](#) en la que, dentro de una visión conjunta y un cuadro común de objetivos globales, se establece un aumento progresivo de inversión pública en I+D hasta alcanzar el 1% del PIB que, junto con un 2% de inversión privada, permita llegar al 3% en el 2030, objetivo marcado por la Unión Europea para los estados miembros en el Pacto por la Ciencia y la Innovación. Es un paso importante, dado que la trayectoria reciente de baja inversión en I+D de España no se corresponde con su potencial económico, ni con la de los países de nuestro entorno.

Como resultado de la EECTI, se ha producido un aumento histórico de la inversión en I+D+I del 60% en 2021 y del 100% en 2022, respecto de los presupuestos de 2020. La mayor parte de este incremento se ha destinado a nuevas convocatorias específicamente alineadas con la estrategia europea, como la de Líneas Estratégicas, Prueba de Concepto, Transición Ecológica y Digital o Refuerzo de las Infraestructuras Científico Técnicas Singulares (ICTS). En la misma línea, se ha producido un aumento en el número de contratos postdoctorales Ramón y Cajal y Juan de la Cierva Formación, junto con una mejora en sus condiciones.

LA SITUACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN EN ESPAÑA: FORTALEZAS Y DEBILIDADES

El equipo anterior en el MICIN realizó, como paso previo a la propuesta de la EECTI, un detallado estudio de las debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades en el sistema de investigación en nuestro país. Este estudio recoge, en nuestra opinión, muchos de los problemas que en la SEA y en otros foros venimos identificando: poca financiación en I+D+I, pública y privada, en relación a los países de nuestro entorno; excesiva burocratización y marcos legislativos inadecuados en la ejecución y justificación de los gastos; poca transferencia del conocimiento al

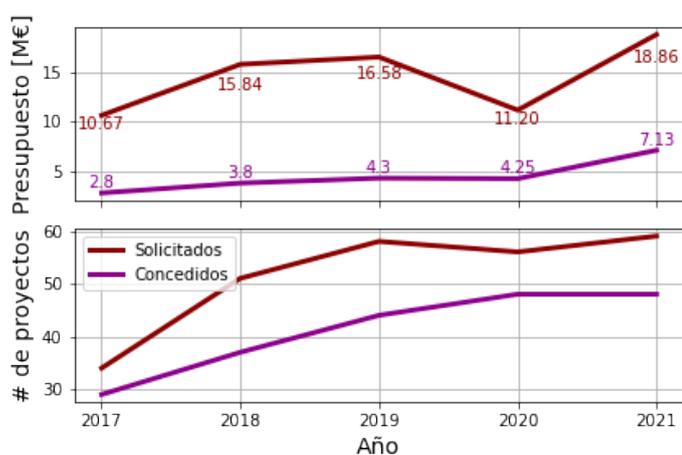


Figura 1. Panel superior: evolución del presupuesto solicitado (costes directos) y concedido en los proyectos de generación de conocimiento en los últimos 5 años. Las etiquetas muestran las cantidades en millones de euros. Panel inferior: evolución del número de proyectos solicitados y concedidos en AYA durante los últimos 5 años.

sector productivo y a la sociedad; condiciones precarias y con discontinuidades en el acceso al sistema de investigación para los jóvenes, y bajo porcentaje de empleos en I+D+I.

PROYECTOS DE GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO

En AYA, el porcentaje de financiación recibida respecto de la solicitada se ha incrementado de manera significativa (Figura 1), desde un 25% en las convocatorias de 2018 y 2019 hasta un 36% en las de 2020 y 2021. Este año, la cantidad total recibida por AYA ha sido de 7,13M€, casi 2.9 M€ más que en la convocatoria anterior, debido al aumento de financiación solicitada, que alcanzó 18,86 M€. Hay que tener en cuenta que el criterio adoptado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) para establecer la competitividad de estas convocatorias no permite que la financiación concedida a cada subárea supere el 40% de la financiación solicitada. Reconociendo la importancia de la competitividad, entendemos que la calidad de los proyectos presentados puede no ser la misma en todas las áreas temáticas consideradas por la agencia. En AYA, más del 80% de los proyectos son valorados como excelentes o muy buenos, por lo que dejar sin financiar al 60% de los proyectos sería un error que, además, iría en contra de los objetivos de la Estrategia.

En este sentido, resaltamos la buena posición que ocupa la Astrofísica en los rankings internacionales. Si consultamos el de Scimago JCR (Journal and Country Rank, datos del 2020), por especialidad y países, España ocupa, en el área de Astrofísica, el séptimo lugar en producción total de artículos de impacto y el quinto en número de citas por artículo. Entendemos que estos resultados se deben, en gran medida, a la estrategia aplicada por los gestores de AYA de financiar todos los proyectos evaluados como excelentes y muy buenos. La parte negativa de esta estrategia es que la financiación recibida por los proyectos es, en promedio, inferior al 50% de la solicitada.

Los principales conceptos para los cuales se solicita financiación en nuestra área son la contratación de personal, principalmente investigadores postdoctorales (60%) y la realización de viajes (20%). Un cambio que se ha observado en la última convocatoria es que se ha duplicado el porcentaje presupuestado para material inventariable (15%), destacando en este concepto los fondos que se destinarían a cálculo intensivo. Es interesante destacar que, dentro de las sub-áreas temáticas en las que se divide el ámbito de ciencia y tecnología, AYA es la que solicita un mayor porcentaje para gastos de personal. En la última convocatoria, se solicitaron 97 contratos para doctores e ingenieros, lo que representa un 55% del total de investigadores solicitantes. Esto quiere decir que, en promedio, la distribución de tareas para la consecución de los objetivos propuestos se hace contando con un equipo 1.55 veces mayor del solicitante¹. Esto puede ser problemático si el proyecto no es financiado en su totalidad, ya que las ayudas concedidas a los proyectos I+D+I se hace de acuerdo a la ley de subvenciones, en la cual se establece que la aceptación de una ayuda implica el compromiso de llevar a cabo todos los objetivos planteados, independientemente del porcentaje de financiación recibida, pudiéndose reclamar una devolución total o parcial en caso contrario.

Por otro lado, se aprecia una tendencia a la fragmentación de los equipos de investigación, con un promedio de 3 integrantes (incluyendo IPs) y 6 miembros en el equipo de trabajo, y sube el porcentaje de proyectos con 2 IPs, que alcanzó un 50% del total. Entendemos que esta tendencia no es ajena a la necesidad de contar con méritos de gestión para la estabilización y/o promoción. Esto no parece tener un impacto

negativo en productividad o excelencia de la investigación, según se refleja en los informes de seguimiento.

El número de mujeres que solicitan proyecto como IPs ha ido aumentando en cada convocatoria de manera progresiva. En las dos últimas, el porcentaje de proyectos con IP o co-IP mujer fue del 22 y 25%, aunque éstos porcentajes bajan hasta un 12-15% si excluimos los proyectos mixtos (con hombre y mujer como co-IPs).

Las solicitudes de proyectos de tipo A (generación de conocimiento no orientada con IPs jóvenes) han ido aumentando desde su introducción en el año 2017 y representan un 18% del total de solicitudes en la última convocatoria. En muchos casos, la duración del proyecto está limitada a dos años, debido a que estos no pueden extenderse más allá de la fecha de finalización del contrato del IP. Por otro lado, este año desapareció la modalidad de proyectos orientados con IP sin vinculación o con vinculación temporal (tipo JIN). Las solicitudes de proyectos coordinados también aumentaron en la última convocatoria a un 23%, frente al 11% del año 2020. Por otro lado, el número de proyectos de 4 años de duración ha disminuido al 13% (8) en el 2021, desde un 20% (11) en la convocatoria anterior.

RECURSOS HUMANOS: CONTRATOS POSTDOCTORALES Y TECNÓLOGOS

En la convocatoria del 2021 han desaparecido los contratos Juan de la Cierva Incorporación y se ha establecido un turno de jóvenes dentro de los contratos Ramón y Cajal, al que se destinan un 43% de las plazas. Los criterios de evaluación, así como las condiciones de los contratos, son iguales para todos los candidatos, pero la experiencia postdoctoral es de 3 a 5 años para el turno de jóvenes, mientras que puede ser de hasta 10 años en el turno general. Dado que no es posible transferir las plazas asignadas de un turno a otro, puede ocurrir que la asignación de plazas no se corresponda con el orden obtenido según los criterios de evaluación, priorizándose finalmente el tiempo transcurrido tras la defensa de la tesis a la excelencia del candidato. Entendemos que este planteamiento de "turno de jóvenes" debería revisarse en convocatorias futuras.

Para resolver el problema de la estabilización, la Ley de la Ciencia fija un porcentaje mínimo en la oferta de plazas que los centros deben dedicar a la estabilización de investigadores que hayan participado en

programas o subprogramas de ayudas postdoctorales y que hayan superado una evaluación de su actividad investigadora. Este porcentaje es de un 25% para los OPI y un 15% para las universidades. En este sentido, entendemos que además podría exigirse a las entidades beneficiarias el contar con un plan de estabilización definido y aprobado para este (y otro) personal investigador. Este plan debería garantizar que quienes cumplan los requisitos exigidos, accedan a un contrato indefinido o plaza en el sistema público de las universidades y OPIs. Esto estaría en la línea inicialmente propuesta por el MICIN de transformar los contratos Ramón y Cajal en plazas tipo "tenure track", conservando las principales características.

Por otro lado, opinamos que el procedimiento de selección podría mejorarse incluyendo una evaluación en dos etapas, que permitiera establecer una "shortlist" de candidatos tras la primera etapa y la posibilidad real de realizar entrevistas.

La distribución de ayudas Ramón y Cajal en cada área temática se realiza en función del número de solicitudes presentadas, teniendo en cuenta el total de solicitudes en ambos turnos y del número de contratos ofertados por los centros, según la fórmula:

Fórmula de distribución de contratos Ramón y Cajal entre áreas científico-técnicas

$$\text{nº contratos asignados}^{\text{área}} = \text{nº contratos}^{\text{totales}} \times \text{media} \left[\frac{\text{nº solicitudes}^{\text{área}}}{\text{nº solicitudes}^{\text{totales}}} \right] \left[\frac{\text{nº contratos ofertados}^{\text{área}}}{\text{nº contratos ofertados}^{\text{totales}}} \right]$$

El informe de seguimiento de la convocatoria Ramón y Cajal elaborado por la AEI, que cubre los años 2008-2019², muestra que el área de Ciencias Físicas (FIS) ha sido, en todas las convocatorias, la que ha presentado un mayor exceso de demanda (respecto de la oferta), mientras que en la mayoría de las áreas del ámbito de las ciencias sociales, la oferta supera a la demanda. Pensamos que debería revisarse la fórmula de distribución de contratos entre las diferentes áreas científico-técnicas, dando más peso al número de solicitudes con calidad por encima del umbral.

En la última convocatoria, el número de plazas Ramón y Cajal asignadas a AYA ha sido de diecinueve, ocho de las cuales fueron para el turno de jóvenes. Estos números representan un incremento de plazas respecto de años anteriores, incluyendo

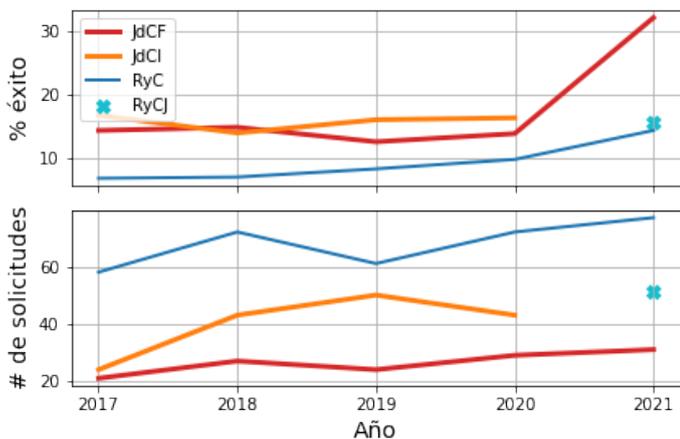


Figura 2. Evolución de la tasa de éxito (panel superior) y número de solicitudes presentadas (panel inferior) en el área de AYA y ESP en las convocatorias Ramón y Cajal, Juan de la Cierva Formación e Incorporación. El asterisco representa los valores de la última convocatoria para el turno de jóvenes de RyC, mientras que el senior se ha incluido en la extensión de la línea RyC de años anteriores.

las plazas Ramón y Cajal y Juan de la Cierva Incorporación. La tasa de éxito de los contratos más senior ha ido aumentando en los últimos años alcanzando un porcentaje del 14% para el turno general en la última convocatoria, frente al 10,6% en la convocatoria 2020. La tasa de éxito para los antiguos contratos Juan de la Cierva Incorporación se ha mantenido en torno al 16% los últimos 3 años si comparamos éstas plazas con los nuevos contratos Ramón y Cajal de "turno de jóvenes".

El número de plazas Juan de la Cierva Formación asignadas a AYA en las convocatorias de 2017 a 2020 ha oscilado entre 3 y 4, mientras que el número de solicitudes se ha ido incrementando. En la última convocatoria, la relación entre el número de solicitudes (31) y las plazas concedidas (10) fue del 32,25%, frente a un 13,8 % en la convocatoria de 2020.

ANÁLISIS DE GÉNERO DE LOS CONTRATOS RAMÓN Y CAJAL Y JUAN DE LA CIERVA.

La Figura 3, extraída del estudio de seguimiento de la convocatoria Ramón y Cajal entre los años 2009-2019², muestra el cociente entre el número de contratos Ramón y Cajal obtenidos y solicitados por mujeres en las distintas áreas temáticas que considera la AEI. Dentro del área de FIS, el porcentaje de contratos obtenidos por mujeres ha sido siempre mayor que el solicitado. Sin embargo, el número de contratos solicitados por mujeres sigue siendo bastante más bajo que el solicitado por hombres. En AYA, el porcentaje de mujeres que solicitaron una plaza Ramón y Cajal de turno general, turno de jóvenes y Juan de la Cierva en la última convocatoria fue del 36, 27.5 y 29% respectivamente.

Otras convocatorias, como la del personal técnico de apoyo, también han sido reforzadas, en línea con los objetivos del plan estratégico de potenciar la incorporación de tecnólogos en el sistema de investigación. En AYA, sin embargo, esta convocatoria no atrae un número alto de solicitudes, estando ausentes importantes centros de investigación. El porcentaje de éxito

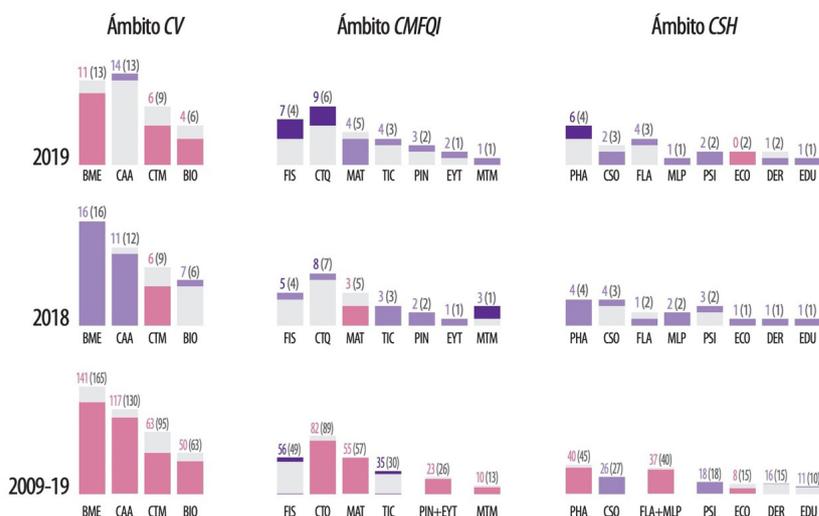


Figura 3. Comparación de los contratos Ramón y Cajal (RyC) esperados (en paréntesis) y obtenidos por mujeres según el número de solicitudes en las diferentes áreas temáticas consideradas por la AEI, separadas en tres ámbitos, Ciencias de la Vida (CV), Ciencias Matemáticas, Físicas, Químicas e Ingenierías (CMFQI) y Ciencias Sociales y Humanidades (CSH). Desde el 2018, el número de contratos obtenidos por mujeres en el área de Físicas ha estado siempre por encima de lo esperado.

para estas plazas en AYA fue de un 10 y un 22% en las convocatorias del 2020 y 2021, respectivamente, mientras que el número de solicitudes recibidas se ha mantenido en torno a 10. El bajo número de solicitudes es un indicador de que la convocatoria no se ajusta a las necesidades de nuestra área y debería revisarse o complementarse con otras nuevas si se quieren cumplir los objetivos del Plan Estatal.

RECURSOS HUMANOS: CONTRATOS PRE-DOCTORALES

El número de contratos pre-doctorales (FPIs) asociados a proyectos no ha variado de forma significativa en los últimos años. En las convocatorias del 2020 /2021 se asignaron 8/11 contratos FPI a AYA, mientras que los solicitados por los proyectos fueron 41/52.

El MICIN se plantea sustituir las FPIs asignadas a los proyectos por contratos pre-doctorales con cargo a la financiación concedida a cada proyecto. En este caso, la selección se realizaría según la normativa de cada institución, como ocurre con los otros contratos de personal. No tenemos aún información, aunque consideramos que podría haber un problema con la duración de los contratos y el tiempo necesario para realizar la tesis doctoral. Entendemos que tenemos pendiente definir esta última etapa universitaria y primera etapa de la trayectoria investigadora. En países de nuestro entorno los contratos pre-doctorales suelen estar asignados a los programas o escuelas de doctorado y/o a las universidades o institutos de investigación. En estos países el principal fin de realizar una tesis doctoral es adquirir un grado de formación universitaria superior (tercer ciclo), lo que facilita la empleabilidad en puestos de cierto nivel. En los países del norte de Europa solo el 30-50% de los doctores se estabiliza en el mundo académico o centros públicos de investigación.

PROGRAMA DE DESARROLLO DE INSTRUMENTACIÓN PARA GRANDES INFRAESTRUCTURAS

Uno de los principales problemas con los que se encuentra el desarrollo de instrumentación astronómica en España es la falta de un marco adecuado, que responda a las necesidades reales. Nos referimos a la duración de estos proyectos (en torno a 7 años), la financiación necesaria, que supera significativamente la de los proyectos de investigación básica, la necesidad de firmar acuerdos a nivel del MICIN de participación y financiación, así como la definición de criterios más adecuados para su evaluación y seguimiento.

«Resaltamos la buena posición que ocupa la Astrofísica en los rankings internacionales. Si consultamos el de Scimago JCR (Journal and Country Rank, datos del 2020), por especialidad y países, España ocupa, en el área de Astrofísica, el séptimo lugar en producción total de artículos de impacto y el quinto en número de citas por artículo.»

En la mayoría de los casos la propuesta de desarrollo instrumental ya ha sido seleccionada y aprobada por los observatorios nacionales o por organismos internacionales, en los que España participa, como ESA o ESO.

En este sentido, los equipos anteriores del MICIN y los gestores de AYA, ESP y FPN elaboraron un programa de desarrollo de instrumentación para grandes infraestructuras científicas que recoge las principales características y necesidades de estos proyectos. Esta iniciativa ha sido recientemente discutida en el marco de la CNA, la RIA, la AEI, y en las Jornadas de Instrumentación celebradas en mayo en el CSIC en Madrid, en las que participaron el director general de ESO, los directores de las seis ICTS y representantes del MICIN y CDTI. Evidentemente este programa también implicaría priorizar unas iniciativas frente a otras, decidiendo una política científica.

Esperamos que los equipos actuales de la AEI y el MICIN tengan la oportunidad de trabajar en su implementación. Ello facilitaría que los equipos españoles pudiesen liderar las propuestas internacionales. Además, se obtendría un retorno para la industria, la ciencia y la tecnología más acorde con la inversión que el gobierno realiza en los organismos internacionales y las ICTS.

Actualmente, los proyectos de desarrollo de instrumentación se financian a través de la convocatoria de proyectos de generación de conocimiento y, en el caso de los asociados a observatorios y centros españoles, también a través de la convocatoria de equipamiento y de las específicas para las ICTS. Algunos de los internacionales pueden financiarse a través de la convocatoria de Proyectos Internacionales de Colaboración, de asignación directa, con varias convocatorias a lo largo del año.

Por otro lado, la nueva Ley de la Ciencia incluye una disposición adicional en la que se habilita al Gobierno para que apruebe las normas oportunas para facilitar la participación de entidades, personal o grupos de investigación españoles en los Consorcios de Infraestructuras de Investigación Europeas (ERIC) creados según las normas de la Unión Europea relativas a los mismos.

ENLACES

- EECTI Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación 2021-2027 (La Estrategia): <https://www.ciencia.gob.es/Estrategias-y-Planes/Estrategias/Estrategia-Espanola-de-Ciencia-Tecnologia-e-Innovacion-2021-2027.html>
- ICTS Infraestructuras Científico-Técnicas Singulares: <https://www.ciencia.gob.es/Organismos-y-Centros/Infraestructuras-Cientificas-y-Tecnicas-Singulares-ICTS.html>
- PEICTI Planes Estatales de Investigación Científica, Técnica y de Innovación: <https://www.ciencia.gob.es/Estrategias-y-Planes/Planes-y-programas/Plan-Estatal-de-Investigacion-Cientifica-y-Tecnica-y-de-Innovacion-PEICTI-2021-2023.html>
- Scimago Journal & Country Rank: <https://www.scimagojr.com/index.php>
- Informe de seguimiento de las convocatorias Ramón y Cajal 2008-2019 https://www.aei.gob.es/sites/default/files/convocatory_info/2021-10/Informe_Programa_Ramon-Cajal_convocatorias_18-19.pdf

NOTAS

- ¹ Este factor es un límite inferior, asumiendo que todos los integrantes del equipo tienen una dedicación del 100% al proyecto.
- ² https://www.aei.gob.es/sites/default/files/convocatory_info/2021-10/Informe_Programa_Ramon-Cajal_convocatorias_18-19.pdf

LA RED AFRICANA DE MUJERES EN ASTRONOMÍA

La Red Africana de Mujeres en Astronomía (AfNWA¹, por sus siglas en inglés) es una iniciativa que tiene como objetivo conectar a las mujeres (o personas que se identifican como tales) que trabajan en astronomía y campos relacionados en África. Se estableció en septiembre de 2020 como uno de los comités de la Sociedad Africana de Astronomía (AfAS², por sus siglas en inglés). Con AfNWA queremos garantizar la participación futura de niñas y mujeres a todos los niveles en el desarrollo de la astronomía y la ciencia en África.

Mirjana Pović

Instituto Etíope de Ciencias Espaciales
y Tecnología (ESSTI), Etiopía
Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA),
Universidad de Ciencia y Tecnología
de Mbarara (MUST), Uganda
mpovic@iaa.es

Vanessa McBride

Oficina de Astronomía para el Desarrollo
(OAD-IAU), Sudáfrica

Priscilla Muheki

Universidad de Ciencia y Tecnología
de Mbarara (MUST), Uganda

Carolina Ödman

Universidad de Western Cape (UWC), Sudáfrica

Somaya Saad

Instituto Nacional de Investigación en
Astronomía y Geofísica (NRIAG), Egipto

Nana Ama Brown Klutse

Universidad de Ghana, Ghana

Salma Sylla Mbaye

Universidad Cheikh Anta Diop (UCAD), Senegal

Y miembros de AfNWA

Nuestros objetivos principales son mejorar el estatus de las mujeres en la ciencia en África y usar la astronomía para inspirar a más niñas a hacer Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (o STEM, por sus siglas en inglés).

¿POR QUÉ AFNWA ES NECESARIA?

Teniendo en cuenta el último informe de la UNESCO y ONU MUJERES, el número de mujeres investigadoras en el mundo (tanto a tiempo parcial como completo) es en promedio < 30% (UNESCO, 2019). Para la mayoría de los países, este número es aún más bajo cuando se consideran las ramas de STEM. Por lo tanto, a nivel mundial nos enfrentamos a una enorme brecha de género en la ciencia. En África, la mayoría de los países tienen un número de mujeres científicas por debajo del 25%, pero la diferencia varía de un país a otro, como Túnez con un 55%, Etiopía con un 13%, o Chad con < 5% de mujeres investigadoras. Sin embargo, estos números son mucho más bajos en el caso de ciencias fundamentales. Sabemos que muchos factores podrían ser responsables del bajo número de mujeres científicas (por ejemplo, la pobreza y el acceso a la educación, las limitaciones sociales, los prejuicios y creencias culturales, la falta de mentoras o modelos a seguir), pero el resultado final es que por estas dificultades estamos perdiendo un enorme potencial y talento que podría beneficiar a nuestra sociedad. Nunca podremos alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (SDGs, por sus siglas en inglés) de la ONU sin empoderar niñas y mujeres, ~50% de la población mundial.

La astronomía y las ciencias espaciales están experimentando actualmente un desarrollo significativo en África (e.g., Pović et al. 2018). Algunos de los indicadores de ese desarrollo son: a) nuevos programas de posgrado en astronomía y astrofísica en todo el continente (por ejemplo, en Egipto, Etiopía, Ghana, Kenia, Marruecos, Namibia, Nigeria, Ruanda, Sudáfrica, Sudán, Uganda), b) fuerte incremento en el número de astrónomos/as profesionales, c) desarrollo significativo de infraestructura en astronomía observacional, d) fuerte desarrollo institucional (fundación de nuevos centros de investigación, agencias espaciales y departamentos de astronomía en las universidades), e) fundación de la Sociedad Astronómica Africana (AfAS) con diferentes comités (ciencia,



Actividades de astronomía con niñas en la escuela Mene, Addis Abeba, Etiopía. Créditos de la imagen: ESSS e ESSTI.

educación/divulgación, AfNWA, etc.), f) creación de >70 sociedades astronómicas de aficionados/as en todo el continente³, o incluso g) un cambio en el compromiso político (por ejemplo, fundación de la Agencia Espacial Africana o desarrollo de nuevas políticas y estrategias de la Unión Africana). Sin embargo, ese desarrollo significativo en astronomía va también acompañado de muchas dificultades. Algunas de estas dificultades son: la mayoría de los países están empezando de cero con el desarrollo en astronomía, eso implica también un número limitado de personal cualificado para llevar a cabo todas las actividades y cubrir todas las necesidades, falta de la infraestructura necesaria para el desarrollo científico, falta de financiación (garantizada a largo plazo)

y apoyo de los gobiernos locales, muchas dificultades en el día a día con la falta (limitación) de infraestructuras básicas (luz ininterrumpida, internet, etc.), la astronomía en África todavía no es accesible para todas/os, falta de información sobre el impacto de astronomía y ciencias fundamentales en el desarrollo socio-económico en África, etc.

Con AfNWA queremos garantizar la participación femenina a todos los niveles de estos nuevos e importantes desarrollos en astronomía y ciencia para el beneficio de toda la sociedad, y que a través de la astronomía y las mujeres en astronomía podemos inspirar y empoderar muchas más niñas para así contribuir en un futuro a la realización de los SDGs de la ONU.

¿CUÁLES SON LOS OBJETIVOS DE AFNWA?

Los principales objetivos de AfNWA son:

- fortalecer y promover la participación femenina en la astronomía en África,
- crear una red fuerte de mujeres que trabajan en astronomía en África,
- fortalecer los vínculos entre mujeres investigadoras, compartir de manera más fácil cualquier información relevante, fortalecer colaboraciones, etc.,
- fortalecer el apoyo y la tutoría entre las/os astrónomas/os senior y jóvenes,
- estudiar y entender las razones principales en distintos países africanos por las que no hay más mujeres y niñas en ciencia,
- explorar las formas de retener a las mujeres en la astronomía y ciencia,
- promover la astronomía, ciencias espaciales, y la ciencia en general entre las niñas y jóvenes para inspirarlas a hacer ciencia,
- dar más visibilidad al trabajo que las mujeres astrónomas están haciendo en África, y que las mujeres astrónomas africanas están haciendo en todo el mundo,
- fortalecer las capacidades de investigación y liderazgo de las mujeres astrónomas, y
- asegurar la participación femenina en los desarrollos actuales y futuros de la astronomía y la ciencia en África y en el mundo.

¿QUIÉNES SOMOS AFNWA?

AfNWA fue creada inicialmente por seis mujeres: profesora Vanessa McBride de la Oficina de Astronomía para el Desarrollo (OAD-IAU, Sudáfrica), doctora Priscilla Muheki de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Mbarara (MUST, Uganda), profesora Carolina Ödman de la Universidad de Western Cape (UWC, Sudáfrica), doctora Mirjana Pović del Instituto Etíope de Ciencias Espaciales y Tecnología (ESSTI, Etiopía), profesora Somaya Saad del Instituto Nacional de Investigación en Astronomía y Geofísica (NRIAG, Egipto), y profesora Nana Ama Brown Klutse de la Universidad de Ghana (Ghana). Recientemente, Salma Sylla Mbaye de la Universidad Cheikh Anta Diop (UCAD), la primera mujer estudiante de doctorado en astronomía en Senegal, también se unió a la junta de AfNWA. La iniciativa empezó cuando Mirjana Pović recibió en 2019 el premio a la ciencia inspiradora de

la revista Nature Research en colaboración con Estée Lauder, y decidió aprovechar la parte económica del premio para crear AfNWA.

AfNWA fue lanzada públicamente en enero 2021, con un fuerte apoyo de AfAS y como uno de sus comités. Hoy AfNWA tiene más de 120 miembros de más de 30 países. Casi el 80% de todas/os los miembros son investigadoras/es jóvenes y estudiantes de master y doctorado. Eso significa que el momento de empezar con AfNWA es adecuado para ofrecer el apoyo adecuado a todas las investigadoras jóvenes y asegurarnos de no perderlas a lo largo de su carrera científica. En un futuro, con AfNWA queremos unir todas las mujeres en astronomía en África. Además, los objetivos de AfNWA no pueden lograrse sin el apoyo pleno y la participación de toda la sociedad, y por eso, se agradece también la participación masculina en las actividades y funcionamiento de AfNWA. En AfNWA estamos orgullosas/os de que actualmente unos 20% de todas/os los miembros son hombres (o las personas que se identifican como tales).

¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES ACTIVIDADES DE AFNWA?

Desde su inicio, se ha hecho un inmenso trabajo para dar la visibilidad a AfNWA y llevar a cabo distintas actividades en línea con los objetivos propuestos. Nuestras principales actividades giran en torno a:

- La creación, mantenimiento, y crecimiento de la red.
- Organización de cursos para mejorar las habilidades y liderazgo de las mujeres (y hombres, ya que la participación no está restringida por género) en astronomía en África. En 2021 hemos organizado 3 cursos virtuales para más de 60 participantes, sobre cómo preparar un CV y una presentación científica.
- Dar visibilidad a las mujeres en astronomía y ciencia en África a través de: informes anuales publicados, boletines, sitio web, organización de charlas públicas, comunicaciones públicas, etc. A lo largo de nuestro primer año, hemos lanzado nuestra propia web, hemos recopilado un primer borrador sobre mujeres en astronomía en África que se presentó durante 8 de Marzo, hemos organizado varias charlas públicas, y 4 sesiones sobre mujeres en ciencia en 4 conferencias internacionales, incluyendo Africa-Europe



Profesora Renee Kraan-Korteweg (izquierda) y doctora Marie Korsaga (derecha), primeras investigadoras que han recibido el premio de AfNWA-ISP dedicado a mujeres en astronomía en África, por su contribución a la investigación y sociedad.

Summit Preview en diciembre 2021 cuando se debatió sobre los movimientos sociales de mujeres en ciencia en África.

Este año vamos a iniciar la edición del primer libro sobre Mujeres Astrónomas en África, que queremos publicar antes del inicio de la próxima asamblea general de la Unión Internacional de Astronomía (IAU, por sus siglas en inglés) que se va a celebrar por primera vez en África en 2024 en Sudáfrica.

- Seguimiento de la trayectoria profesional de las mujeres en astronomía y campos afines en África, para garantizar que se quedan en ciencia si así lo desean. Esta es una de las actividades de AfNWA a largo plazo, que queremos potenciar en los próximos años.
- Apoyo a las actividades de investigación de mujeres en astronomía y campos relacionados a través de: supervisión de estudiantes de maestría y doctorado, proyectos de investiga-

ción conjuntos, propuestas de subvenciones conjuntas, etc.

- Organización de 2 premios anuales para mujeres investigadoras senior y junior en astronomía en África. Este año se han dado los primeros dos premios en colaboración con International Science Programme (ISP) de la Universidad de Uppsala. El premio senior de investigación en astronomía fue otorgado a la Profesora Renee Kraan-Korteweg de Sudáfrica y premio junior a la Doctora Marie Korsaga de Burkina Faso.
- Organización y participación en actividades de divulgación para promover la ciencia a través de la astronomía y para inspirar a más niñas en STEM. Pronto AfNWA va a anunciar una llamada para apoyar las actividades de divulgación de ciencia y trabajo con las niñas en África.
- Promoción de mujeres en ciencia en planes estratégicos y desarrollo de futuras políticas.

RECOMENDACIONES DE AFNWA SOBRE LA BRECHA DE GÉNERO EN LA CIENCIA

En AfNWA hemos desarrollado importantes recomendaciones para las futuras políticas y planes estratégicos para minimizar a largo plazo la brecha de género en ciencia, en África y en todo el mundo. Estas recomendaciones ya se han presentado en varias conferencias internacionales. Algunos de los puntos principales son:

- Realizar el estudio para comprender los principales factores responsables de la falta de mujeres y niñas en STEM en diferentes partes de África, y desarrollar medidas adecuadas para mejorar la situación en el futuro (por ejemplo, feminización de la pobreza, escolarización de niñas y abandono, acceso a la universidad, presión social para casarse y tener hijos, la carga de cuidado de los miembros de la familia, y otros).
- Dar visibilidad a la labor que realizan las mujeres en la ciencia, para que así puedan inspirar a muchas/os más, en particular niñas.
- Fortalecer el sistema de becas de posgrado para mujeres en ciencia, permitiéndoles la posibilidad de tener una familia y continuar con sus estudios de master o doctorado, y que no tengan que elegir entre ser madres (con toda la presión social que esto implica, en particular en África) o científicas.
- Fortalecer el sistema para tener en cuenta la familia, funciones y/o cualquier interrupción justificada en la investigación en todas las evaluaciones de CV (por ejemplo, durante las solicitudes de empleo, becas, propuestas de subvenciones, premios, etc.).
- Reforzar el apoyo al cuidado de personas dependientes miembros de la familia durante actividades particulares de investigación (por ejemplo, asistencia a conferencias/formación, visita de investigación, actividad de investigación específica, etc.).
- Formar comités cumpliendo requisitos de equilibrio de género.
- Fortalecer las habilidades profesionales y de liderazgo de mujeres investigadoras.
- Garantizar contratos más estables para las mujeres (y hombres) en ciencia sustituyendo infinitos puestos posdoctorales y contratos

temporales de investigación con puestos que les permitan compaginar la familia con su investigación y profesión.

- Favorecer el uso de métodos doble ciego en la preselección de candidatos/as para trabajos y becas (preselección sin saber nombres - y por lo tanto género) para así reducir el sesgo inconsciente y/o cualquier conflicto de interés.
- Dar más visibilidad a la brecha de género en la ciencia y porque es importante minimizarla y tener más mujeres investigadoras.
- Dar más visibilidad sobre la importancia de la ciencia y oportunidades laborales, sobre todo cuando se trata de ciencias fundamentales y ramas de STEM.

¿QUIERES SER MIEMBRO DE AFNWA?

Para ser miembro de AfNWA sólo hace falta rellenar un pequeño formulario accesible aquí: <https://afnwa.org/join-afnwa/>. No existe ninguna cuota económica para formar parte de la red, para participar en distintas actividades, o para llevarlas a cabo.

Los miembros de AfNWA agradecemos enormemente el apoyo de la Sociedad Africana de Astronomía, de Departamento Sudafricano de Ciencia e Innovación (DSI), y de Nature Research y Estée Lauder por el Premio de Ciencia Inspiradora otorgado a Mirjana Pović.

NOTAS

¹ <https://afnwa.org>

² <https://www.africanastronomicalsociety.org>

³ <https://www.africanastronomicalsociety.org/ama-teur-astronomy-associations-in-africa>

REFERENCIAS

- UNESCO, Women in Science report 2019 <http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/fs55-women-in-science-2019-en.pdf>
- Pović, M., et al., 2018, Nature Astronomy, 2, 507, 'Development in Astronomy and Space Science in Africa'



De izquierda a derecha y de arriba a abajo, Mirjana Pović, Vanessa McBride, Priscilla Muheki, Carolina Ödman, Somaya Saad, Nana Ama Brown Klutse y Salma Sylla Mbaye, autoras de este artículo.

ASTRÓNOMAS: UN VIAJE A TRAVÉS DEL UNIVERSO

“AstrónomAs” es una exposición virtual que se centra en las mujeres dedicadas al estudio de la Astronomía y la Astrofísica. Alojada en la web www.astronomas.org, incluye información de más de trescientas astrónomas que trabajan o han trabajado en uno o varios de los catorce temas en los que se estructura la muestra. Recoge los más variados acentos de etnias, ámbitos geográficos, categorías profesionales o diversidad funcional.



Josefina F. Ling

Universidad de Santiago de Compostela
josefinaf.ling@usc.es

Adriana de Lorenzo-Cáceres

Instituto de Astrofísica de Canarias
adrianadelorenzocaceres@gmail.com

Eulalia Pérez Sedeño

Instituto de Filosofía (CSIC)
eulalia.psedeno@cchs.csic.es

Miguel Cerviño

Centro de Astrobiología (INTA-CSIC)
mcs@cab.inta-csic.es

La complementan diferentes materiales: una contextualización de la Astronomía con otras ciencias, su relación con la cultura (cine, literatura, arte, etc.), cuadernillos didácticos descargables, juegos interactivos, *podcasts*, vídeos y una banda sonora original compuesta por una joven futura astrofísica con gran talento musical. También cuenta con una versión física de dieciséis paneles explicativos disponibles en castellano, catalán y gallego. Sus objetivos son fomentar las vocaciones científicas y tecnológicas en general y entre las niñas y adolescentes en particular, divulgar las investigaciones realizadas por mujeres científicas en el ámbito astronómico (enfaticando la importante contribución española), las innovaciones afines y las perspectivas de futuro.

¿QUÉ ES ASTRÓNOMAS?

Desde hace varias décadas se está trabajando en dar visibilidad a la contribución de mujeres en todos los ámbitos y, en especial, en el desarrollo del conocimiento. Se trata de reparar una injusticia epistémica histórica, reconociendo el trabajo que han hecho y hacen, y que muchas veces pasa desapercibido. Pero la visibilización no es solo una cuestión histórica. Hoy en día el trabajo de las mujeres permanece desapercibido en muchos ámbitos, en especial en aquellos tradicional y estereotípicamente masculinos como son las ciencias. Y, sin embargo, en la actualidad la participación de las mujeres es enorme a todos los niveles.

Tal es el caso de la Astronomía en el siglo XXI, cuando las astrónomas que forman parte del mundo de esta ciencia incorporan las nuevas formas de ver y aprender de la mano de las tecnologías de la información y de la comunicación.

Por ello, utilizando como hilo conductor las aportaciones de las mujeres al desarrollo de la Astronomía y la Astrofísica desde tiempos pretéritos hasta la actualidad, hemos creado una exposición moderna, digital, interactiva y didáctica definida por la transversalidad de objetivos y que posee un principio, pero no un final: **AstrónomAs**. Su naturaleza se sustenta en el éxito de otra exposición previa de carácter museístico, “Con A de astrónomas”, nacida en el Año Internacional de la Astronomía 2009 y que recorrió multitud de escenarios durante doce años. El testigo de su renovación y adaptación fue recogido por otro equipo multidisciplinar de profesionales que pertenecen a los ámbitos de la Astronomía profesional y

DE LA MANO DE CENTENARES DE MUJERES

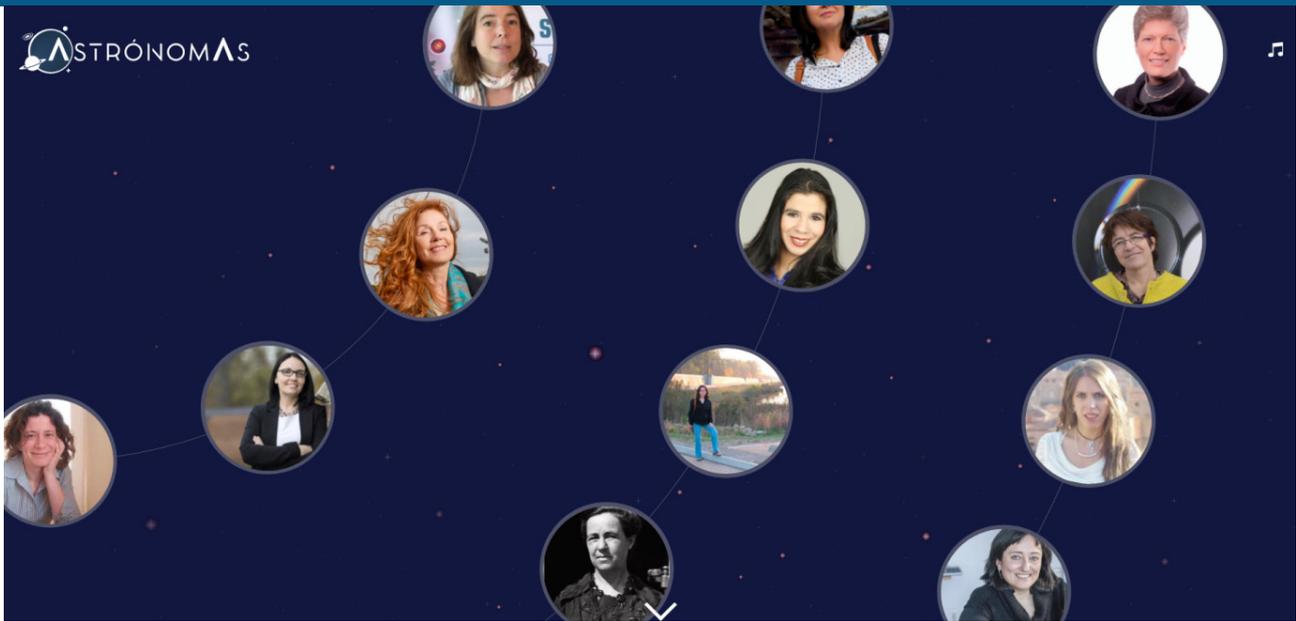


Figura 1. Página de inicio de la Web de la exposición.

amateur, Filosofía, Historia de la Ciencia, Estudios culturales y de Género y Enseñanza media y universitaria. El producto resultante ha sido posible gracias a la colaboración de los organismos a los que pertenecen los quince miembros del equipo de trabajo (*), la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología del Ministerio de Ciencia e Innovación y la Sociedad Española de Astronomía (SEA).

¿QUÉ PODEMOS ENCONTRAR EN ASTRÓNOMAS?

El protagonismo se centra en las historias de ciencia y de vida de más de trescientas mujeres que trabajan o han trabajado en uno o en varios de los catorce temas en los que está dividida la exposición: el Sol, el Sistema Solar, estrellas y cúmulos estelares, exoplanetas, medio interestelar, estrellas moribundas, nuestra Galaxia, galaxias, cúmulos de galaxias, física de astropartículas, agujeros negros supermasivos, cosmología, *software* y *big data* e instrumentación.

La contribución de las mujeres al desarrollo de la Astronomía ha sido siempre fundamental e irremplazable, aunque para ello hayan tenido que luchar contra viento y marea; por eso AstrónomAs recoge figuras de todas las épocas como Aglaonike de Tesalia (siglo I o II a.C.) o Asunción Catalá i Poch (siglo XX). El buen quehacer y la pasión por saber conoce trabas, pero no fronteras: en AstrónomAs se muestran mujeres de las más variadas etnias y ámbitos geográficos, como Paris Pismis (turca emigrada a México), Jedidah Isler (afroamericana), Silvia Torres Peimbert (mexicana) o Emilia Kilpua (finlandesa). La

inteligencia científica supera las más difíciles adversidades en forma de sesgos de género o diversidad funcional; en el caso de las mujeres, estos obstáculos se añaden a los prejuicios y desigualdades históricas, pero ellas demuestran su tesón para ser escuchadas y es por ello por lo que AstrónomAs recoge ejemplos como Jessica Mink (mujer transgénero), Cecilia Mc Gough (que convive con la esquizofrenia) o Sonia Duffau (comunicadora de Astronomía para personas sordas y minorías). Por último, el lento avance que nuestra sociedad está experimentando en temas de inclusión e igualdad de género se refleja también en AstrónomAs, que incluye mujeres de distintos ámbitos profesionales y etapas académicas tales como Marisa García Vargas (empresaria) o Cristina Cabello (estudiante de doctorado).

AstrónomAs nos muestra además que las historias de sus protagonistas femeninas trascienden los meros hechos biográficos. Para proporcionar una visión completa, la exposición incluye información sobre la relación de la Astronomía con otras ciencias y con la cultura en general; cuadernillos didácticos descargables; juegos interactivos en línea; *podcasts* y vídeos en nuestro canal de Youtube. Todo ello envuelto en una preciosa banda sonora, compuesta por una joven talento musical, Paula Espinosa, futura astrofísica y finalista en la edición 2020 del concurso “La Voz” de Antena 3 TV.

AstrónomAs cuenta además con el apoyo de una versión impresa reducida, constituida por dieciséis paneles que siguen las catorce temáticas citadas anteriormente

junto a un panel de introducción y otro de créditos. En la estética del panel, diferente para cada uno, conviven una imagen y una pincelada descriptiva del tema, con fotos y perfiles de tres o cuatro astrónomas y un código QR que enlaza a la exposición virtual. El motivo, tal y como nos ha enseñado la experiencia anterior, ha sido la gran demanda de este tipo de material por parte de las más diversas instituciones (centros de enseñanza, bibliotecas, centros cívicos, asociaciones, etc.) para realizar actividades pedagógicas en torno a él.

¿CÓMO SE PUEDE VISITAR ASTRÓNOMAS?

El vehículo principal elegido para realizar el recorrido de la exposición es, quizás, el más popular dentro de las tecnologías digitales: una página web. Un elemento dinámico, independiente del momento y del lugar en que nos encontremos, y de fácil acceso desde los más variados dispositivos electrónicos (ordenadores, tabletas, teléfonos móviles, etc.). De navegación amigable, nos permite conocer a sus protagonistas y sus perfiles tanto científicos como personales, pulsando sobre sus imágenes (fig. 1) o mediante un buscador por nombre y apellidos (fig.2). Con otro golpe de clic podemos profundizar en conceptos relacionados con su trabajo o ir a los temas que desarrollan. Y dentro de esas áreas de trabajo (fig. 3), bajo la pregunta **¿Sabes?** podremos conocer la relación de las astrónomas con el arte, la música, el cómic, etc.

En **¿Pruebas?** se esconde material didáctico que nos enseñará a usar las reglas para medir el Universo, a ver quince amaneceres en un día o a conocer el código secreto de las estrellas. Finalmente, **¿Juegas?** permitirá poner a prueba los conocimientos adquiridos durante la visita, llevando a cabo la Misión Hipatia.

Mientras que la página web principal de AstrónomAs está exclusivamente en español, existen versiones en castellano, catalán y gallego (fig. 4) del formato físico de los paneles. Sus archivos se pueden descargar gratuitamente desde la propia página web, pero las instituciones que lo deseen pueden también solicitar, en régimen de préstamo sin coste alguno (excepto el del transporte), este material ya impreso formado por dieciséis lonas enrollables de tamaño 100cm x120cm y un total de 15 Kg de peso, fácilmente transportable. Para ello basta con dirigirse a cualquiera de las sedes que los custodian (en castellano: CAB.INTA-CSIC, CEFGA, FAAE, IAA-CSIC, IAC, IFS-CSIC; en catalán: ICCUB, UV y en gallego: USC), a las personas del equipo que pertenecen a dichos organismos (*).

¿CUÁLES SON LOS OBJETIVOS DE ASTRÓNOMAS?

El propósito de esta exposición es cautivar la atención del gran público de una forma novedosa, amena

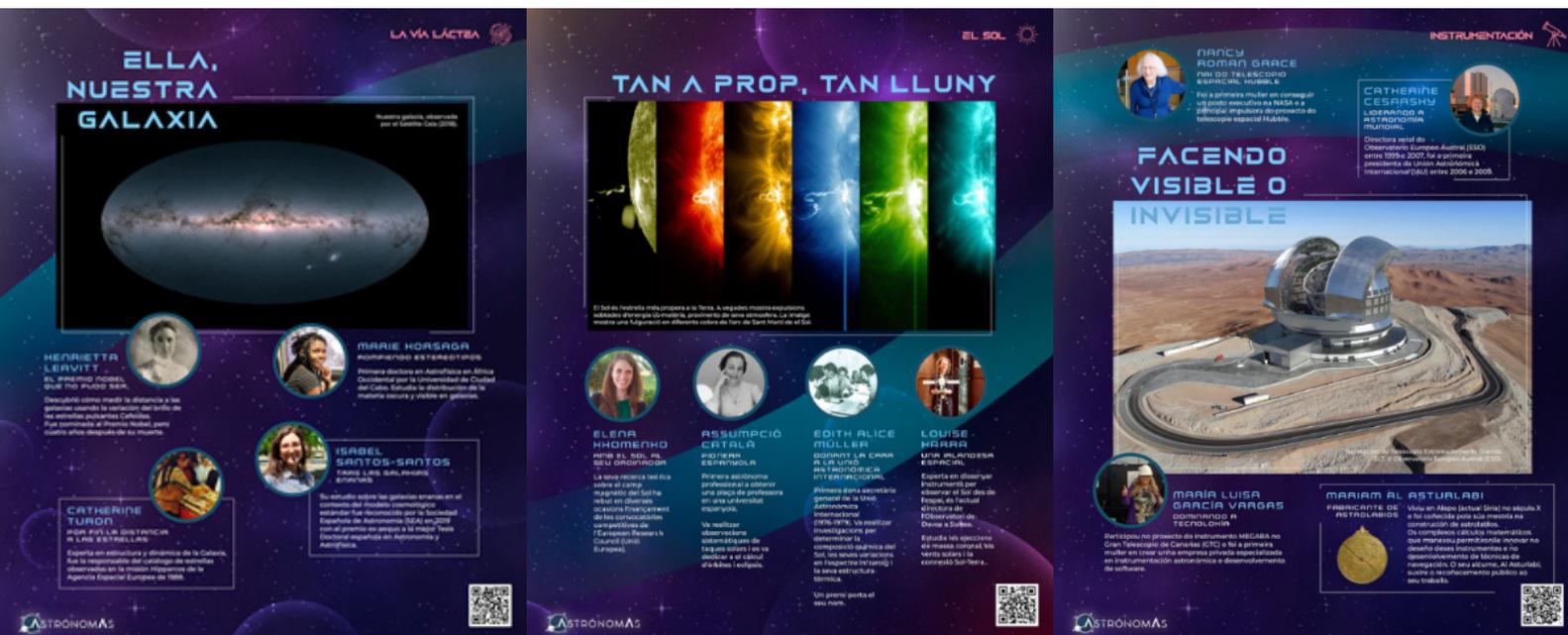


Figura 2. AstrónomAs con nombres y apellidos.



Figura 3. Ejemplo de la página sobre el tema de “galaxias”.

Figura 4. Ejemplos de paneles físicos en castellano, catalán y gallego.



e intuitiva, para promocionar la cultura en la sociedad mediante la difusión de conocimientos científicos adaptados a todas las edades; incrementar el nivel educativo a través de la elaboración de material didáctico (fig. 5); avanzar hacia la igualdad efectiva entre mujeres y hombres, dando visibilidad al importante papel que las mujeres han tenido en la evolución de la Ciencia; y, por último, fomentar las vocaciones científicas entre estudiantes y adolescentes mediante la aportación de modelos de referencia.

¿QUIÉN HA VISITADO ASTRÓNOMAS?

La exposición fue lanzada a finales del mes de septiembre de 2021. Para su difusión en las redes sociales se contó con los departamentos de cultura científica y gabinetes de comunicación de los centros de trabajo de las personas pertenecientes al equipo, así como una importante contribución de la SEA. El público acogió AstrónomAs con los brazos abiertos: la noticia de la inauguración virtual alcanzó a más de mil personas en *Facebook* y *Twitter* en tan solo una semana. Desde ese momento y durante sus primeros seis meses de vida, la exposición virtual recibió casi 5000 visitas de público sito principalmente en España, EE. UU., México y Argentina, a través no solo de ordenadores de sobremesa sino también de dispositivos móviles (principalmente teléfonos y

algunas tabletas) en una proporción de aproximadamente 50%-50%. Este hecho refleja la importancia de haber creado una exposición moderna y digital tal y como demanda la sociedad actual.

El tráiler de AstrónomAs ha sido reproducido casi 4000 veces en nuestro canal de *YouTube*, que cuenta con más de un centenar de personas suscritas. Los vídeos soporte sobre temáticas particulares (agujeros negros y tecnología), de creación posterior, acumulan ya un centenar de visualizaciones. En cuanto a la exposición física, ha recorrido museos, centros educativos y otras instituciones de Andalucía, Aragón, Canarias, Cantabria, Castilla la Mancha, Cataluña, Galicia, Madrid y Valencia (fig.6).

EL FUTURO DE ASTRÓNOMAS

AstrónomAs es una exposición viva, que irá incorporando de manera moderada el papel de las profesionales de la Astronomía en todas sus áreas temáticas con un foco especial en mantener actualizado el trabajo de las mujeres relacionadas con España. La transversalidad de contenidos, el formato virtual y la importancia de sus objetivos la convierten en una exposición llamada a perdurar en el tiempo y acoger así a las niñas que la visitan hoy y que serán las AstrónomAs del mañana.

Figura 5. Ejemplos de portadas de cuadernillos didácticos.





Figura 6. Fotos de la exposición de paneles en diversas instituciones.

* **EQUIPO DE TRABAJO** (fig. 7.)

Josefina F. Ling: Comisaria de la Exposición, Universidad de Santiago de Compostela (USC)
 Miguel Cerviño: Subcomisario, Centro de Astrobiología (CAB.INTA-CSIC)
 Ana Romero: Subcomisaria, Instituto de Filosofía del CSIC (IFS-CSIC),
 Almudena Alonso-Herrero (CAB.INTA-CSIC)
 Antonio Francisco Canales, Universidad Complutense de Madrid (UCM)
 Francesca Figueras, Instituto de Ciencias del Cosmos, Universidad de Barcelona (ICCUB)
 Adriana Kiczkowski, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)

Adriana de Lorenzo-Cáceres, Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)
 Isabel Márquez, Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC),
 Vicent Martínez, Universidad de Valencia (UV)
 Josefa Masegosa (IAA-CSIC)
 Eulalia Pérez Sedeño (IFS-CSIC)
 María Dolores Rodríguez Frias, Universidad de Alcalá (UAH)
 Blanca Troughton, Federación de Asociaciones Astronómicas de España (FAAE)
 Jesús Varela, Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA).



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

PREMIOS

Nuestra sociedad está de enhorabuena este semestre ya que diversos miembros han recibido muy merecidos premios relacionados con su actividad profesional, que en varios casos ha tenido también una importante repercusión a nivel social. Los premiados han sido:

Francisco Javier Bailén Martínez (IAA-CSIC), que ha obtenido el premio a la mejor tesis, dentro de la convocatoria "IAU PhD Prizes" 2021, en la sección "Facilities, Technologies and Data Science" (División B), por su trabajo "*Spectropolarimetric and imaging properties of Fabry-Pérot etalons. Applications to solar instrumentation*", dirigido por el Profesor José Carlos del Toro Iniesta y el Doctor David Orozco Suárez; la tesis fue defendida en la Universidad de Granada.

David Barrado Navascués (CAB), quien ha sido galardonado con el premio a la mejor tesis en la sección "Education, Outreach and Heritage" (División C), dentro de la convocatoria "IAU PhD Prizes" 2021, por su trabajo "*Cosmografía: la ciencia de los dos orbes*", dirigido por la Profesora Margarita Box Amorós, y defendido en la Universidad de Alicante.

Ramón García López (IAC), que recogió el premio al hito tecnológico por el LST-1 (Large Size Telescope) en el marco de los European Technology Awards, en nombre de la colaboración LST-1.

Rafael Luque Ramírez, cuya tesis titulada "Planetary Systems Around Red Dwarfs and Activity of their Host Stars" ha recibido una mención de honor concedida por la División F "Planetary Systems and Bioastronomy" de la IAU en el marco de la convocatoria "IAU PhD Prizes" 2021.

Elena Manjavacas (STScI) ha sido nombrada hija predilecta de Castilla-La Mancha "*por su aportación a la ciencia, promoviendo la visibilidad y la participación de las mujeres en este campo*". El nombramiento se hizo en el acto oficial que se celebró en Puertollano.

María del Prado Martín Moruno (UCM) recibió el premio For Women In Science L'Óreal-Unesco España, en su XII edición, por sus investigaciones sobre las ondas gravitatorias.

Isabel Márquez (IAA-CSIC) recibió el premio "Granada Ciudad de la Ciencia y la Innovación" en la categoría

"Mujer y Ciencia" por su carrera profesional y a su labor en la promoción y la visibilización del papel de las mujeres en la astronomía. Por otra parte, la **Unidad de Cultura Científica del IAA-CSIC** fue premiada en la modalidad de 'Divulgación Científica' por sus actividades pioneras que exploran todo tipo de lenguajes y formatos.

Josefa (Pepa) Masegosa (IAA-CSIC), a quien le ha sido otorgado el premio Mariana Pineda de Igualdad 2022, concedido por la ciudad de Granada en esta su octava edición. Estos premios "*reconocen a aquellas personas y entidades que hayan contribuido y destacado en la promoción de la igualdad entre mujeres y hombres en Granada*".

Núria Miret Roig (Universidad de Viena), que ha sido galardonada con el premio MERAC (Mobilising European Research in Astrophysics and Cosmology) 2022, otorgados por la European Astronomical Society (EAS), a la mejor tesis en Astronomía observacional por "*el descubrimiento de muchos nuevos planetas flotantes, que iluminan el origen de esos exóticos planetas nómadas*".

Casiana Muñoz Tuñón (IAC) ha sido homenajeada por el consejo escolar de un nuevo Instituto de Educación Secundaria en Córdoba, que decidió poner su nombre a este centro educativo.

Aina Palau Puigvert (Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM), que ha sido premiada con el Reconocimiento Sor Juana Inés de la Cruz, de la UNAM, un galardón que otorga anualmente el día 8 de marzo, Día Internacional de la Mujer, a las universitarias "*por su talento y esfuerzo que contribuyen al desarrollo de las funciones sustantivas de la UNAM - docencia, investigación y difusión de la cultura*".

Nanda Rea (IEEC-CSIC), ha sido galardonada con el Premi Nacional de Recerca 2017 al Talent Jove que otorga la Generalitat de Catalunya y la Fundació Catalana per la Recerca i la Innovació (FCRi) por su trayectoria científica, centrada en los magnetares.

Lourdes Verdes-Montenegro (IAA-CSIC), coordinadora de la participación científica y tecnológica de España en el Square Kilometre Array (SKA), ha sido galardonada con el premio Ada Byron a la Mujer Tecnóloga 2022, galardón instituido en 2014 por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Deusto.

NECROLÓGICA

Este semestre tuvimos que despedir a **Carmen Morales Durán**, una de las pioneras de la Astronomía en España, desde sus inicios en los grupos científicos de INTA, posteriormente investigadora en el LAEFF) desde 1991, y en el Centro de Astrobiología (CAB) hasta su jubilación hace pocos años. Carmen ayudó a abrir camino a generaciones posteriores en una disciplina todavía incipiente en España. Entre otros logros fue la investigadora principal por parte española de EURD (Espectrógrafo Ultravioleta extremo para la Radiación Difusa), un instrumento que voló a bordo de Minisat-01, el primer minisatélite español, a mediados de los 90. Sirvió a la comunidad como miembro de la Junta Directiva de la SEA. Descanse en paz.

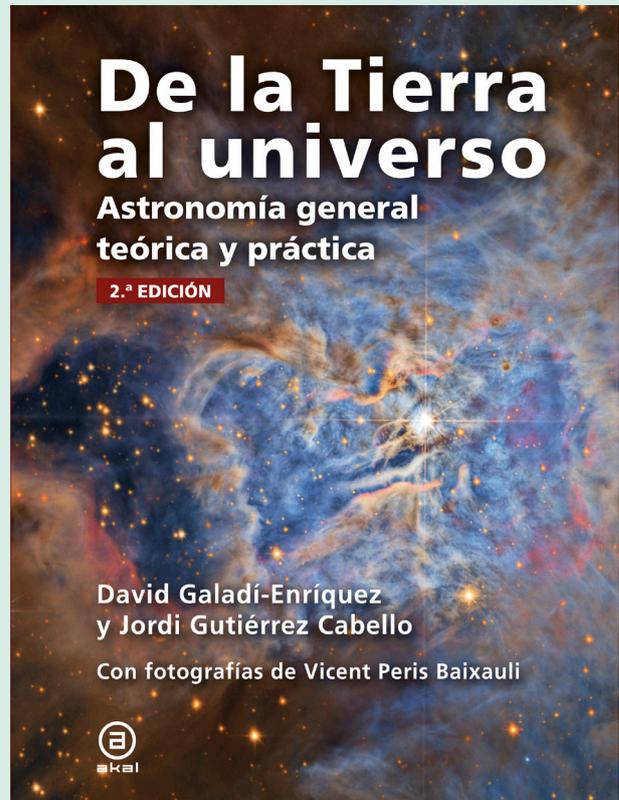
DE LA TIERRA AL UNIVERSO. ASTRONOMÍA GENERAL TEÓRICA Y PRÁCTICA. 2ª Ed.

David Galadí-Enríquez y Jordi Gutiérrez Cabello
ISBN: 978-84-460-5145-9
Editorial Akal

En 1880, el astrónomo francés Camille Flammarion publicaba su obra más conocida *Astronomie Populaire*, un libro de 800 páginas, que contenía 360 figuras incluyendo grabados y mapas del cielo. El libro recibió el premio *Montyon* de la Academia Francesa. En 1894 se tradujo al inglés. En 1906 se publicó en castellano una edición “modernizada” por José Comás y Sola, director entonces del Observatorio Astronómico del Tibidabo. El propio Comás y Sola escribió más tarde, en 1929, “El Cielo. Novísima Astronomía Ilustrada” y, en 1935, su obra enciclopédica “Astronomía” que se reeditaría en diferentes ocasiones a lo largo del siglo XX. Estas obras de astronomía general han sido muy importantes para hacer llegar a los lectores interesados, en cada momento histórico, los conocimientos básicos de astronomía. En el mercado editorial anglosajón hay numerosos ejemplos de libros de este tipo.

El volumen que es objeto de esta reseña, escrito por dos socios de la SEA, se enmarca perfectamente en esta tradición. Es una obra de marcado carácter enciclopédico que presenta en siete partes lo aspectos fundamentales de lo que conocemos del universo. La esmerada edición de Akal contribuye notablemente a hacer de este volumen una obra muy recomendable, no solo como referencia básica para los muchísimos aficionados a la astronomía de habla hispana sino también como libro de consulta para estudiantes universitarios de cursos introductorios y profesores no universitarios que imparten temas de astronomía en sus clases o que llevan a cabo actividades relacionadas.

Las diferentes partes del libro cubren el espectro habitual de estas obras (Historia, el Firmamento, Instrumentación, el Sistema Solar, Estrellas, la Galaxia y Cosmología). Los autores han hecho un gran esfuerzo por presentar unos contenidos tremendamente actualizados e introducen un novedoso sistema de referencias cruzadas (semejante a los hipervínculos) que facilitan la lectura no lineal del texto sin perderse por desconocer los conceptos de los que se habla en cada capítulo. Por ejemplo, si en la sección sobre “La expansión del universo”, en la parte final del libro, se nombra “el Efecto Doppler”, aparece en el margen un número recuadrado que indica la página donde este efecto se introduce en capítulos anteriores.



La lectura se hace muy fluida: los autores escriben de manera amena pero rigurosa. Dominan ampliamente los temas tratados (en muchos casos, corrigiendo errores habituales de otras obras de divulgación, como por ejemplo cuando marcan las diferencias entre la Ley de Hubble y la relación velocidad-distancia). Las ilustraciones, en muchos casos diagramas sencillos y originales fácilmente reproducibles en la pizarra, se conjugan muy bien con el texto y ayudan enormemente a su comprensión. Las imágenes astronómicas, muchas de ellas obtenidas y/o procesadas por el astrofotógrafo Vicent Peris son un importante valor añadido de la obra ya que abren una ventana observacional a las explicaciones teóricas, ventana que se complementa con las numerosas actividades de observación y afianzamiento propuestas tanto en el propio texto como en la web accesible a través del código QR que aparece al final del índice.

El libro cuenta con un magnífico prólogo de Eduard Salvador-Sole sobre la “utilidad de la astronomía”. Me permito finalizar esta reseña con sus propias palabras: “se trata de una obra imprescindible para los amantes del universo con ganas de saberlo todo de él”.

Vicent J. Martínez
*Observatori Astronòmic
Universitat de València*

PELIGROS CÓSMICOS. EL INCIERTO FUTURO DE LA HUMANIDAD

David Barrado Navascués

ISBN: 978-84-415-4351-5

Editorial Oberon

Después de milenios explorando y colonizando la superficie terrestre podemos decir que el Homo Sapiens ha conseguido dominar la Tierra. Eso sí, con unos costes medioambientales y humanos enormes. La presión sobre la vida silvestre ha tenido consecuencias, entre ellas las múltiples epidemias que hemos sufrido, una todavía no superada. No satisfechos con esto, siempre hay individuos de nuestra especie que agreden violentamente y de manera sistemática a otros en diversas partes del mundo, en África, Asia, América y Europa. Somos unos verdaderos supervivientes.

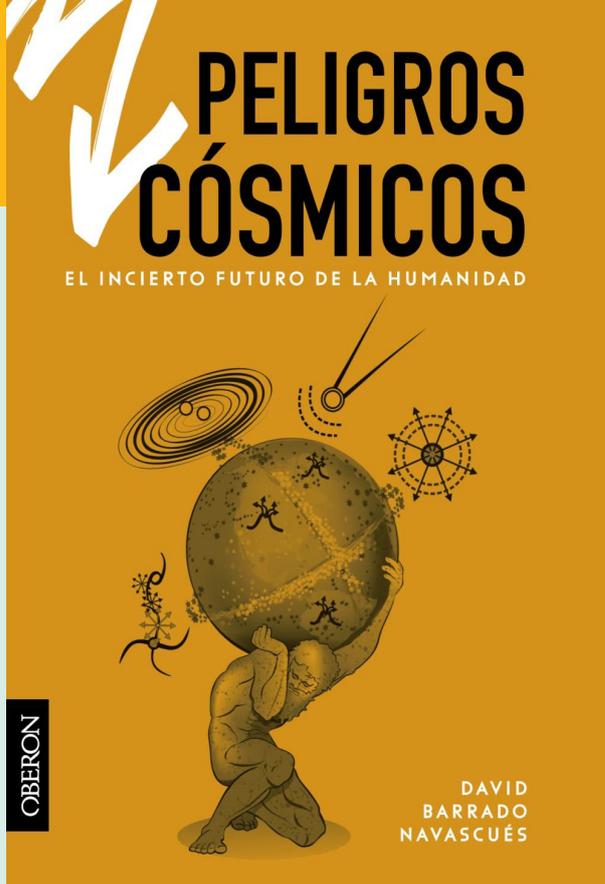
Preocupados por los conflictos terrestres causados por la intransigencia y la codicia humanas que ponen en jaque la supervivencia de la humanidad, como las guerras actuales o futuras o el cada vez más presente cambio climático, no podemos olvidar otras amenazas que pueden venir de muy lejos, del espacio exterior. De estas, de momento, la humanidad no puede hacer nada o muy poco para protegerse.

De hecho, nuestros ancestros eran bien conscientes de la caducidad de nuestra civilización. Muchas mitologías, además de los mitos de la creación del mundo incluyen también relatos de su destrucción. Creación y Apocalipsis, Ginnungagap y Ragnarök, el principio y el fin de la humanidad son inherentes al proceso normal de la vida humana.

Frente a estas ideas místicas, la revolución científica del siglo XVII y XVIII nos ofreció un cosmos como entidad organizada, con leyes universales que permiten predecir el futuro. Con Newton y Laplace llegamos a pensar que el Sistema Solar funcionaba como un reloj cósmico, que si no quedaba dominado sí que estaba controlado.

Sin embargo la soberbia humana por pretender el dominio del cosmos ha quedado desterrada tras los avances de la astrofísica. Ahora conocemos mejor los peligros cósmicos que nos acechan. El primero que se nos viene a la mente es la posible caída de un asteroide sobre la Tierra, provocando una hecatombe. Esto ya lo ha sufrido nuestro planeta varias veces a lo largo de su historia geológica.

Pero son muchos más los peligros a los cuales se enfrenta nuestra civilización. Entre ellos, ahora que nos acercamos al máximo del ciclo solar, podríamos destacar las colosales emisiones de masa coronal del Sol (CME, de sus siglas en inglés), que podrían acabar con nuestra tecnología si vienen dirigidas hacia la Tierra. La meteorología espacial, con la ayuda de toda una flota de sondas mirando al Sol, trata de conocer mejor estos eventos catastróficos para protegernos de ellos.



El libro **Peligros cósmicos. El incierto futuro de la humanidad** de David Barrado Navascués nos detalla estos y todos los otros riesgos a los cuales la humanidad deberá hacer frente en un tiempo cercano o muy lejano. David es exhaustivo al relatar todos los peligros que nos aguardan, desde los que resultan de la evolución de la Tierra y el Sol, a los movimientos y muerte de las estrellas próximas, los cuerpos errantes e incluso la evolución y final del cosmos.

La información que nos ofrece David está escrupulosamente al día. Así conoceremos los intentos de las agencias espaciales para protegernos del más que probable armagedón cósmico, las búsquedas sistemáticas de cuerpos errantes o los estudios sobre los efectos en la red eléctrica del impacto de una CME. Además el libro está lleno de referencias literarias, que lejos de distraer al lector, lo encauza en el tema a tratar y nos recuerdan que las preocupaciones sobre nuestro final siempre han estado en la mente de los escritores.

Pero al contrario de lo que podría parecer, el libro no es catastrofista ni nos predispone a temer al cosmos, sino que, aprovechando la explicación de las amenazas ciertas, nos detalla las maravillas del universo del que, no lo olvidemos, formamos parte.

Acabo con la reflexión final que hace David en el libro: "Disfrutemos de nuestro propio Edén, cuidándolo de manera adecuada. Investiguemos los fenómenos del universo, indagando sobre su estructura y evolución. Pero tengamos en cuenta que nuestro mundo es en extremo frágil y que el cosmos, en su indiferencia, es insistente y asombrosamente hostil".

Enric Marco
Dept. Astronomia i Astrofísica
Universitat de València

ÚLTIMAS NOTICIAS DEL UNIVERSO

Jon Marcaide

ISBN: 978-84-670-6254-0

Editorial Espasa

En estos tiempos de carencias y penurias sociales que nos han tocado vivir -uso una frase literal de la penúltima página del libro- Jon Marcaide nos regala un estimulante libro y nos lleva, de la mano de Sam, un estudiante, candidato a doctor en astrofísica del Massachusetts Institute of Technology, por un camino que describe de forma rigurosa lo que el título del libro resume de forma concisa: las últimas noticias y descubrimientos de ese universo que nunca deja de sorprendernos. El tono del libro es de alta -ique nadie se asuste de este calificativo!- y amena divulgación, y todo él está impregnado de explicaciones físicas que ayudan a poner en contexto esos descubrimientos.

Últimas noticias del universo es realmente dos libros en uno. La voz cantante del primero la lleva Sam Rey, que desde el comienzo de su doctorado toma la costumbre de poner por escrito sus ideas científicas, relacionadas con descubrimientos recientes, tanto para ordenar su mente, como para compartirlas con su padre, Jim, ingeniero de NASA en Pasadena, y su hermana Lisa, siete años más joven que él. Esos escritos, sin la envoltura de una narración, podrían constituir por sí mismos un libro de divulgación, extraordinario en su contenido pero no diferente de otros textos en la forma. El segundo libro es el continente del primero, donde el autor, Jon, hila los escritos de Sam, las conversaciones con Jim y Lisa, y sus dudas y vivencias para coser un relato fluido que toca múltiples campos de la astrofísica, y cuya lectura es difícil de abandonar: un capítulo lleva a otro y para cualquier persona interesada y amante de la astronomía o de la ciencia en general, el texto se convierte en algo adictivo.

Aparte de esos tres personajes, en torno a Sam encontramos a Nico, compañero de habitación en la residencia de estudiantes graduados, a Hans, amigo del padre de Nico, astrofísico y profesor en una universidad de Madrid, y a un curioso ente, SUP, del que Sam se vale para hacer entender de una forma sencilla algunos conceptos, haciéndole saltarse las leyes físicas y viajar instantáneamente a cualquier lugar y tiempo del universo, abarcando pasado, presente y futuro: "Sam, has explicado muy bien el universo temprano, lo que los científicos de la Tierra creen que fue el universo primitivo. Tendríamos que darnos una vuelta por allí para que vieras lo que fue en realidad. Prepárate, nos vamos." Mi ascendencia manchega no puede por menos que comparar ese viaje de Sam y SUP, "...me vi transportado como por encanto hacia el fondo del universo...", con las impresiones de Sancho Panza a lomos de Clavileño "...y si esto no se me cree, tampoco creará vuestra merced cómo me vi tan junto al cielo, que no había de mí a él palmo y medio, y por lo que puedo jurar, que es muy grande además." (Q2, XLI)... buen invento este SUP.



Sam escribe su primer texto en otoño de 2017, recién incorporado al MIT, y se centra en las ondas gravitatorias. El comienzo de su entusiasta iniciativa epistolar coincide con el galardón del Premio Nobel de Física a Rainer Weiss, Kip Thorne y Barry Barish por sus trabajos que llevaron a la detección de este nuevo mensajero de información procedente del universo. Sam cogió el gusto a esa forma de comunicarse con su padre y hermana, y a la primera entrega siguieron otras dos sobre el espacio-tiempo y los agujeros negros. Además de ser un sedante para el estrés, no hay nada mejor, se decía Sam, que escribir para comprobar qué entendía de verdad y qué no. Los 39 capítulos del libro nos llevan desde las estrellas y los exoplanetas hasta el universo temprano, cerrando el bucle con una actualización sobre el primer tema, las ondas gravitatorias.

Quien conozca al autor quizás encuentre en Sam un *alter ego* de su época de doctorado en el MIT y halle en él algunos de los rasgos que caracterizan no solo su labor como divulgador en este libro, sino su trabajo como científico: no pocas veces Sam no queda del todo contento con lo que escribe y pule su texto hasta que considera que lo que trasmite es completamente inteligible. El libro abre y cierra casi al final un pequeño paréntesis dedicado a un viaje que realizan Sam y Nico a España, donde visitan a Hans. Para el lector que no pertenezca a la comunidad astronómica, Jon, esta vez a través de la experiencia de Hans -¿también en cierto modo otro *alter ego*?...- da algunas interesantes pinceladas acerca de alguna de las realidades del sistema español de investigación. En suma, un libro para aprender ciencia y disfrutarla. Yo he hecho ambas cosas.

Benjamín Montesinos
Centro de Astrobiología
CSIC-INTA

Evolución del polvo interestelar en las envolturas de las nubes moleculares. Traza observacional y predicciones teóricas

Autora: Leire Beitia Antero

Tesis doctoral dirigida por:

Ana Inés Gómez de Castro

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 23 de abril de 2021

Esta tesis está centrada en el estudio de la evolución del polvo interestelar en las envolturas de las nubes moleculares y su traza observacional a longitudes de onda ultravioleta. Debido a los tamaños característicos de los granos de polvo, su interacción con los fotones ultravioleta es altamente efectiva y produce trazas notables en la curva de extinción; los más notables son la joroba o *bump* a 2175 Å, producida por grandes moléculas carbonáceas, y la pendiente en el ultravioleta lejano, que tiene origen en los fenómenos de dispersión y absorción de fotones ultravioleta por los granos de polvo más pequeños.

En una primera aproximación, se han estudiado las variaciones estadísticas del *bump* a 2175 Å en los complejos de formación estelar de Orión y Roseta. Este trabajo hace uso de dos grandes cartografiados del cielo: el mapa de fotometría ultravioleta del *Galaxy Evolution Explorer* (GALEX) y el mapa en infrarrojo cercano del *Two Micron All Sky Survey* (2MASS). El estudio de la extinción relativa entre la banda ultravioleta cercana de GALEX, que incluye el *bump*, y la banda infrarroja K s de 2MASS, que da cuenta de la extinción de los granos de mayor tamaño, han permitido identificar variaciones en la población de granos más pequeños debido a procesos de crecimiento en regiones densas, o de destrucción en zonas donde el campo de radiación es más intenso. Este estudio aporta unas medidas estadísticas significativas de las variaciones de la población de polvo, probablemente producidas por el crecimiento de los granos en las envolturas de las nubes moleculares. Este régimen es muy complejo y se requieren simulaciones numéricas para estudiar la evolución de los granos de polvo de menor tamaño.

Los códigos de mecánica de fluidos permiten estudiar la evolución de una nube molecular. Sin embargo, la mayoría de estos códigos no tienen en cuenta la dinámica de los granos de polvo que están embebidos en el gas. En esta tesis se han desarrollado dos módulos que permiten modelar la dinámica y la evolución de una población de polvo interestelar en las envolturas de las nubes moleculares, teniendo en cuenta los fenómenos de crecimiento y destrucción del polvo. El principal resultado de este trabajo es la identificación de estrechos filamentos de polvo que se forman por la acción de los campos magnéticos y que se encuentran desacoplados del gas. Estas concentraciones de polvo favorecen el crecimiento de los granos a pesar de la baja densidad del medio, aunque los procesos de destrucción contrarrestan la eficiencia del crecimiento y limitan el tamaño máximo que pueden adquirir los granos. Estas variaciones en la población de polvo se traducen a su vez en variaciones de la curva de extinción, que son especialmente notorias a longitudes de onda cortas debido a la disminución de la población de granos de polvo pequeños.

En resumen, esta tesis presenta el primer estudio completo de la evolución del polvo interestelar en las envolturas de las nubes moleculares, tanto desde el punto de vista teórico como desde el punto de vista observacional. Mientras que la fotometría ultravioleta permite un estudio estadístico de las variaciones en la población de polvo, las simulaciones numéricas permiten distinguir la influencia de los distintos procesos involucrados en dichas variaciones. Este trabajo predice la formación de filamentos de polvo cargado en las envolturas de las nubes moleculares acoplados al campo magnético, lo que sin duda afectará a la propagación de ondas hidromagnéticas. Además, el crecimiento de los granos en estos filamentos producirá variaciones en la curva de extinción que podrán detectarse a través de observaciones espectroscópicas.

Morfología y metalicidad de galaxias del cartografiado OTELO

Autor: Jakub Nadolny

Tesis doctoral dirigida por: Jordi Cepa,

Ángel Bonigiovanni y Miguel Cerviño

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias

(IAC) y Universidad de La Laguna (ULL)

Fecha de lectura: 14 de mayo de 2021

En esta tesis exploramos el cartografiado OTELO (*OSIRIS Tunable Filter Emission Line Object*). Gracias al uso de los filtros sintonizables del instrumento OSIRIS del *Gran Telescopio Canarias*, OTELO recupera objetos con líneas de emisión hasta flujos muy débiles. El método de tomografía permite construir espectros de baja resolución ($R \sim 700$) para todos los objetos detectados. El flujo de línea límite estimado es de $4,6 \times 10^{-19}$ erg s⁻¹cm⁻², haciendo del cartografiado OTELO el más profundo en flujo de línea disponible hasta la fecha.

En particular, en este trabajo presentamos un catálogo morfológico de los objetos de OTELO detectados en las imágenes de alta resolución del instrumento ACS del *Hubble Space Telescope*. Para ello hemos usado un método paramétrico que ajusta un modelo 2D informado por el perfil de Sérsic, incluido en la versión multionda de la aplicación GALFIT. Este programa ajusta instantáneamente el perfil seleccionado a los objetos seleccionados en las bandas fotométricas disponibles mediante el uso de funciones polinómicas de Chebyshev. Comparando con la versión estándar de GALFIT, mostramos que la versión multionda del mismo programa proporciona resultados más robustos, en particular en el régimen de baja señal a ruido. Adicionalmente, los resultados de la inspección visual de los objetos seleccionados (hasta magnitud $I = 24,5$) son consistentes con los parámetros estimados mediante GALFIT. Usando los mismos parámetros probamos varios métodos de segregación de galaxias tempranas y tardías; también investigamos la relación entre la masa estelar y el tamaño para ambos tipos de objetos. Además de lo anterior, confirmamos la evolución de la mediana de la masa estelar hasta $z = 2$.

Usando el catálogo morfológico descrito, seleccionamos una muestra de las galaxias tempranas en emisión (ET-ELG). La naturaleza y el origen de las líneas de emisión en estos objetos están siendo investigadas aún. Usando una muestra de 14 objetos de ET-ELG a un desplazamiento al rojo, comparamos la densidad de estos objetos con una muestra local análoga extraída del cartografiado SDSS. Encontramos que OTELO detecta una densidad considerablemente mayor de ET-ELG que en la muestra a bajo desplazamiento al rojo del SDSS. Estos resultados se mantienen, aún teniendo en cuenta la varianza cósmica – la fuente de incertidumbre más importante para un cartografiado con una cobertura angular discreta (~ 56 arcmin²) como OTELO.

Por último, investigamos la relación entre la masa estelar y la metalicidad de una muestra de objetos con emisión en H α a $z \sim 0,4$. En particular, y aprovechando la capacidad de OTELO de detectar objetos con flujo límite muy bajo, estudiamos una muestra de emisores de línea con muy baja masa ($\sim 10^7 M_{\odot}$). La gran mayoría de estos objetos están clasificados morfológicamente como galaxias de disco, con un índice de Sérsic bajo, lo esperado para las galaxias con formación estelar activa. No hemos encontrado evidencia alguna de evolución de la relación masa-metalicidad desde $z = 0,4$.

Tesis disponible en: <https://www.educacion.gob.es/teseo/mostratRef.do?ref=1963899>

Acresción y diagnóstico del viento estelar en el sistema binario de rayos X de alta masa 4U1700-37 a través del análisis espectroscópico de alta resolución en rayos X

Autora: María Martínez-Chicharro
(maria.chicharro@ua.es)

Tesis doctoral dirigida por:

José Miguel Torrejón Vázquez

Centro: Universidad de Alicante

Fecha de lectura: 28 de mayo de 2021

Los sistemas binarios de rayos X con compañera supergigante han suscitado un renovado interés en los últimos años como herramienta para el estudio de vientos estelares en estrellas masivas. Estas estrellas poseen fotosferas tan calientes que constituyen la fuente principal de fotones UV de las galaxias. Sus potentes vientos y su final como supernova, inyectan una cantidad significativa de materia y energía mecánica en el medio interestelar que las convierten en auténticos motores cósmicos. En las binarias de rayos X de alta masa, un objeto compacto (estrella de neutrones o agujero negro) orbita profundamente embebido en el viento estelar de la estrella óptica,

acretando material. Esta acreción alimenta una potente fuente de rayos X que, a su vez, irradia el viento produciendo una serie de transiciones y líneas de emisión cuyo análisis aporta una valiosa información sobre las propiedades del viento, así como del propio flujo de materia acretante sobre el objeto compacto.

En esta tesis se utilizan las observaciones llevadas a cabo por nuestro equipo con el espectrógrafo de rendija de transmisión (HETG) a bordo del telescopio espacial de rayos X *Chandra*, de la NASA, del sistema binario de alta masa con donante supergigante 4U1700-37. Para la reducción de los espectros de alta resolución hemos utilizado el software *ciao* (v 4.4). El análisis espectral se ha realizado con el software *Interactive Spectral Interpretation System* (isis) v 1.6.1-24.

El primer objetivo es estudiar el proceso de acreción y la naturaleza del objeto compacto. El descenso radical de temperatura durante un estallido de rayos X es explicado mediante el enfriamiento Compton, lo que proporciona evidencias de la naturaleza del objeto compacto del sistema 4U1700-37 como una estrella de neutrones magnetizada.

El segundo objetivo es estudiar la estructura/física de las inhomogeneidades del viento estelar a través de la espectroscopía de alta resolución. Se encuentra que: a) el brillo de las líneas de emisión de las transiciones de la capa K, correspondientes a especies neutras, están directamente correlacionadas con la iluminación del continuo. Estas líneas no disminuyen significativamente durante el eclipse. Una posible explicación sería que estas líneas provinieran principalmente del viento estelar. b) Las líneas altamente ionizadas Fe xxv heliogenoide y Fe xxvi hidrogenoide Ly alfa disminuyen durante el eclipse, por lo que deberían producirse cerca del objeto compacto donde el parámetro de ionización es mayor que 3. c) Para describir las líneas de emisión del continuo se requiere la suma de dos modelos de plasma fotoionizado, uno con baja ionización (logaritmo del parámetro de ionización = -1) y otro con alta (logaritmo del parámetro de ionización = 2,4). De las medidas obtenidas para las líneas podemos estimar un cociente de densidades alrededor de 300 entre las zonas de mayor y menor densidad del viento. Para ajustar el complejo del Si xiii heliogenoide, el plasma requiere un ensanchamiento de las líneas debido a movimiento general del plasma. Para reproducir el flujo observado de las líneas r y f es necesario añadir una tercera componente de plasma ionizado colisionalmente. d) El ancho de las líneas no está resuelto, a excepción del silicio. No hay una clara distinción o separación radial entre las especies cuasineutras e ionizadas, lo que es consistente con las inhomogeneidades frías embebidas en el medio caliente y enrarecido que podrían estar constituyendo el viento.

Tesis disponible en: <http://hdl.handle.net/10045/121004>

Cartografiado del cielo del hemisferio norte con QUIJOTE-MFI a 10–20 GHz: construcción y estudio de los mapas, y caracterización de la emisión de microondas del Haze

Autora: Federica Guidi

Tesis doctoral dirigida por: José Alberto

Rubiño-Martín y Ricardo Génova-Santos

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias

(IAC) y Universidad de La Laguna (ULL)

Fecha de lectura: 10 de septiembre 2021

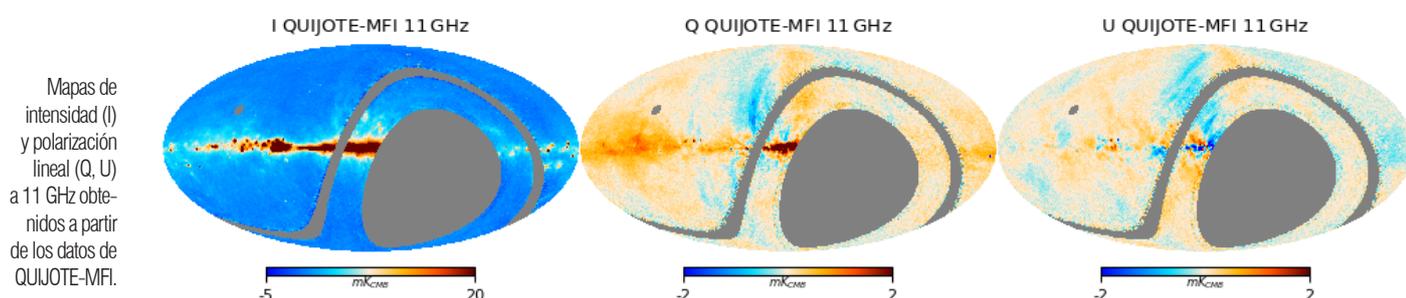
Las ondas gravitacionales primordiales generadas durante la inflación deberían observarse como una huella característica en la polarización en grandes escalas angulares del Fondo de Microondas Cósmico (CMB). Esta huella se conoce como modos B del CMB y aún no ha sido observada. Con el fin de poder obtener una detección limpia de los modos B primigenios, es extremadamente importante caracterizar la emisión Galáctica polarizada de polvo y sincrotrón, y controlar con alta precisión los efectos sistemáticos de la instrumentación de microondas. Esta tesis se desarrolla en este contexto, presentando un análisis de los datos del instrumento MFI del experimento QUIJOTE, que, entre los años 2012 y 2018, midió la intensidad y la polarización lineal del cielo de microondas desde el Observatorio del Teide, en el rango de frecuencias 10–20 GHz. El objetivo de QUIJOTE-MFI es caracterizar con alta precisión la emisión Galáctica de baja frecuencia, en particular la emisión anómala de microondas (AME) y el sincrotrón polarizado, para complementar el estudio de las anisotropías de polarización del CMB.

En esta tesis se ha desarrollado el código de elaboración de mapas PICASSO (Guidi et al., 2021), el cual se utiliza para construir los mapas de intensidad y de polarización lineal del experimento QUIJOTE. PICASSO permite una reconstrucción muy precisa de las grandes escalas angulares de la señal de cielo, siendo esto fundamental para estudios relacionados con los modos B. PICASSO ha sido validado con simulaciones realistas de datos de QUIJOTE-MFI, mostrando que la señal recuperada del cielo diverge menos de un 0,001% de la señal de entrada en multipolos en el rango $20 < l < 200$. El estudio de la función de transferencia del código ha demostrado que el 100% de la señal del cielo se recupera en escalas $l > 10$, con solo un 2% de pérdida de potencia en $2 < l < 8$ para los modos E y B de la señal polarizada.

Este código ha sido aplicado para construir los mapas en intensidad y en polarización de todo el hemisferio norte Galáctico (*wide-survey*), en cuatro frecuencias en el rango 10–20 GHz y utilizando datos obtenidos durante un tiempo efectivo de observación de un año. Esta tesis presenta una caracterización detallada de estos mapas, basada principalmente en el cálculo de sus espectros de potencias. Los espectros de potencias de estos mapas en polarización (que están claramente dominados por emisión sincrotrón) fueron modelados utilizando una ley de potencias $C_l \propto l^{-\alpha}$, con $\alpha = -3.000.16$ para el modo E y $\alpha = -3.090.41$ para el B. Asimismo, se ha medido el cociente entre la amplitud de la potencia de los modos E y B en $l = 80$, obteniendo $ABB/AEE = 0.340.10$. Este valor es menor que el cociente para la emisión de polvo térmico derivado de los datos de Planck ($ABB/AEE = 0.5$; Planck Collaboration et al., 2018c). También se han medido los espectros TB y EB de los mapas, siendo estos compatibles con cero dentro de las incertidumbres, y se ha detectado marginalmente el espectro TE en multipolos bajos. Además, se han presentado los resultados de diferentes pruebas de validación de los datos. Estos resultados se publicarán en Rubiño-Martín et al. (en preparación), que irá acompañado por un conjunto de artículos centrados en la explotación científica de los datos del *wide-survey* de QUIJOTE-MFI. Los mapas se harán públicos una vez aceptadas las publicaciones asociadas.

Por último se analizaron nuevos datos de QUIJOTE-MFI en el Haze, una región que se extiende alrededor del centro Galáctico hasta altas latitudes ($b < 35$) y que presenta una fuerte emisión en microondas, con contrapartidas en otras longitudes de onda: las burbujas de Fermi en rayos gamma y las regiones elongadas observadas en datos de polarización en radio (a 2,3 GHz). El Haze es una emisión difusa de origen incierto que podría estar asociada con el decaimiento de partículas de materia oscura o con actividad nuclear del centro Galáctico. Utilizando datos de QUIJOTE-MFI, detectamos, con un nivel de confianza de 9, un exceso de señal difusa en intensidad, el cual podría atribuirse a la emisión del Haze, y cuyo espectro presenta una ley de potencias correspondiente a un sincrotrón con índice espectral $H = -2.790.08$ en el rango de frecuencias 11–60 GHz. Este índice corresponde a un espectro con una pendiente ligeramente mayor que la encontrada en resultados anteriores, por ejemplo en Planck Collaboration et al., (2013) donde se obtuvo $H = 2.560.05$. Sin embargo, y de acuerdo con trabajos anteriores, observamos que el espectro del Haze es más plano que el del sincrotrón total en la misma área y rango de frecuencias, el cual presenta un índice espectral $s = -3.000.03$. Además, se observó una diferencia entre el índice espectral de intensidad de las burbujas Norte y Sur del Haze, con un nivel de confianza de 6. Finalmente, se realizó un estudio específico de las estructuras y filamentos polarizados posiblemente asociados con el Haze, que determinó un cambio en el índice espectral hacia valores con una pendiente mayor en bajas frecuencias, en consonancia con lo observado por Carretti et al., (2013). Estos resultados se publicarán en Guidi et al. (en preparación).

Tesis disponible en: <https://www.educacion.gob.es/teseo/mostratRef.do?ref=2040939>



Poblaciones estelares de galaxias masivas en el IR cercano: explotación de nuevas instalaciones de telescopios de gran diámetro terrestres y espaciales

Autor:a Elham Eftekhari Ardakani
(elhamea@ipm.ir)

Tesis doctoral dirigida por:

Alexandre Vazdekis y Francesco La Barbera
Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias
(IAC) y Universidad de La Laguna (ULL)

Fecha de lectura: 26 de noviembre de 2021

Esta tesis tiene como objetivo explotar el rango espectral infrarrojo para el estudio de las poblaciones estelares de las galaxias masivas de primeros tipos. La atención se centra específicamente en los efectos de la variación de la Función Inicial de Masas (incluida su forma en el extremo de muy bajas masas), las abundancias relativas de elementos y la detección de componentes estelares de edad intermedia mediante el análisis de las líneas de absorción de los espectros galácticos. Se investiga y optimiza la metodología para explotar la información disponible mediante la definición de un nuevo sistema de índices espectrales en este rango espectral. Se incluye un amplio conjunto de índices completamente caracterizados no solo en lo que respecta a su sensibilidad a los parámetros de las poblaciones estelares, sino que también se caracterizan los efectos sistemáticos debido a diversos aspectos como el ensanchamiento de las líneas causado por la velocidad de dispersión, desplazamiento de longitud de onda, relación señal-ruido, calibración en flujo y cualquier contaminación debida al cielo. Se ilustra el potencial de esta batería de índices espectrales mediante varias aplicaciones en las que se muestra que es posible romper la degeneración entre la abundancia relativa de elementos α y la Función Inicial de Masas. Ello permite distinguir no solo si dicha función es estándar o dominada por estrellas enanas, sino su forma específica en el extremo de muy baja masa.

Se presenta un análisis detallado de galaxias de primeros tipos enfocado a las bandas de absorción molecular de CO. En comparación con las predicciones de los modelos de poblaciones estelares, el CO en la banda K a $2,3 \mu\text{m}$ es significativamente más fuerte. Se afronta este reto, aún no resuelto, mediante observaciones recientes y datos de archivo, encontrándose que las líneas de CO en la banda H también muestran valores más altos que los modelos, dando lugar a una discrepancia similar a la de la banda K. Se explora el posible origen de tal discrepancia y, aunque no se obtiene una solución completamente satisfactoria, se descarta que la discrepancia sea debida a poblaciones estelares de edad intermedia (dominadas por estrellas AGB de masa intermedia). Sin embargo se identifica un subgrupo estelar con fuertes líneas de CO, pertenecientes a la biblioteca empírica que alimenta los modelos de poblaciones estelares, que podrían contribuir a disminuir la discrepancia observada. Este resultado apunta

al efecto de la abundancia relativa de carbono en las estrellas gigantes de baja temperatura como posible explicación a la fuerte intensidad de las líneas de CO.

En esta tesis se estudia la presencia de poblaciones estelares de edad intermedia mediante la comparación de los índices de CO medidos en una muestra de galaxias de primeros tipos muy masivas con los correspondientes de la galaxia reliquia masiva prototipo, NGC 1277. Esta galaxia alberga poblaciones estelares muy viejas y "prístinas" a lo largo de toda su distancia galactocéntrica por lo que nos ofrece una oportunidad única para investigar el origen de la fuerte absorción de CO característica de las galaxias masivas. Se observa que NGC 1277 no solo muestra valores de CO más altos que las predicciones de los modelos sino que los valores medidos son similares a los encontrados en la población general de galaxias de primeros tipos masivas. Con esta evidencia empírica se puede descartar que la discrepancia observada se deba a la existencia de poblaciones estelares de edad intermedia. Esta interpretación mayoritaria a partir de los primeros estudios en el rango infrarrojo implicaría que las galaxias masivas presentan historias de formación estelar más extendidas en el tiempo, lo cual contrasta con las restricciones obtenidas a partir del rango visible. El nuevo hallazgo obtenido aquí es capaz de conciliar las restricciones obtenidas a partir de los rangos óptico e infrarrojo.

Otro objetivo de esta tesis es poner a prueba las capacidades del instrumento infrarrojo EMIR, instalado en GTC (el mayor telescopio de la actualidad), para el estudio de la historia de formación de las galaxias masivas mediante el análisis de sus poblaciones estelares. Se adoptaron varios enfoques observacionales y se mostró que es posible aprovechar al máximo el potencial de las múltiples rendijas del espectrógrafo EMIR para observar y derivar las poblaciones estelares y los gradientes de las galaxias masivas tanto en cúmulos de galaxias como aisladas y también en galaxias reliquias. Es preciso notar que el advenimiento de la espectroscopía de campo integral en el óptico abrió una nueva era para el estudio de los gradientes de poblaciones estelares. Del mismo modo, la estrategia observacional propuesta aquí para estudiar las variaciones radiales de los parámetros relevantes de las poblaciones estelares supone un avance significativo para estos estudios en el rango infrarrojo. Asimismo en esta tesis se ilustra el proceso de reducción de un conjunto de datos EMIR abordando los problemas que presenta este rango espectral. La identificación de las limitaciones del instrumento y de los datos obtenidos resulta extremadamente útil para la comunidad de astrónomos que desean realizar estudios espectroscópicos de líneas de absorción con EMIR.

Tesis disponible en:

<https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/26882/Stellar%20populations.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Espectroscopía de estrellas FGKM para la explotación científica de la búsqueda de exoplanetas con CARMENES

Autor: Emilio Gómez Marfil

Tesis doctoral dirigida por: David Montes

Gutiérrez y Hugo Martín Tabernero Guzmán

Centro: Universidad Complutense de Madrid

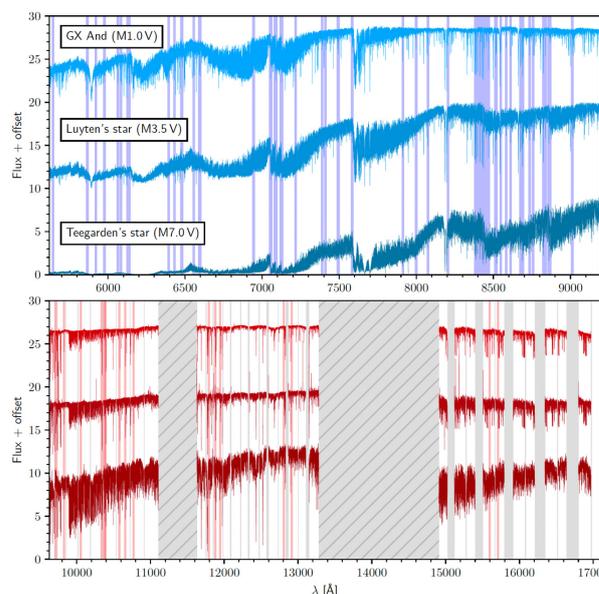
Fecha de lectura: 4 de febrero de 2022

El interés que suscita la búsqueda de exoplanetas ha impulsado el desarrollo de espectrógrafos de alta resolución como CARMENES, instalado en el telescopio de 3,5 m del observatorio de Calar Alto en Almería (España) y diseñado para mejorar las medidas de velocidad radial y permitir así la detección de planetas de tipo terrestre alrededor de estrellas distintas al Sol. Entre ellas, las enanas de tipo M constituyen candidatos ideales dada su ubicuidad en el vecindario solar, sus bajas temperaturas y masas, lo que favorece las detecciones mediante las técnicas de velocidad radial y de tránsitos.

En este contexto, la determinación de los parámetros atmosféricos estelares es crucial para caracterizar los sistemas planetarios y arrojar luz sobre su formación y evolución. CARMENES, gracias a su alta resolución y su cobertura espectral simultánea en el óptico y el infrarrojo cercano, proporciona información valiosa para el análisis de las estrellas frías y brinda la oportunidad de volver a evaluar técnicas clásicas, como el método de las anchuras equivalentes y la síntesis espectral, para estimar el impacto de la región infrarroja en el cálculo de parámetros estelares.

El objetivo principal de la tesis doctoral ha sido la caracterización de estrellas de tipos FGKM observadas con CARMENES en el contexto de la librería estelar y el programa de observaciones de tiempo garantizado del instrumento. Para ello, se han empleado el método de anchuras equivalentes y la técnica de síntesis espectral sobre espectros de alta resolución en el óptico ($R = 94600$, 5200–9600 Å) y en el infrarrojo cercano ($R = 80400$, 9600–17100 Å). Los espectros de estrellas de tipo FGK se han caracterizado con el código STEPAR como implementación del método de anchuras equivalentes, mientras que los espectros de estrellas de tipo M se han analizado con el código STEPARSYN, una implementación bayesiana de la síntesis espectral basada en cadenas de Markov Monte Carlo. Ambos códigos son adecuados para una determinación precisa de los parámetros atmosféricos estelares de estrellas FGKM, en particular la temperatura efectiva T_{eff} , la gravedad superficial $\log g$ y la metalicidad estelar $[\text{Fe}/\text{H}]$. Como parte integral del estudio, se han empleado diferentes modelos de atmósfera (MARCS, BT-Settl y PHOENIX-ACES) y códigos de transferencia radiativa (MOOG y *Turbospectrum*).

El análisis ha permitido caracterizar 65 estrellas de tipo FGK y 343 enanas de tipo M observadas con CARMENES. La cuidadosa selección de 653 y 23 líneas de Fe I y Fe II, respectivamente, útiles para el método de anchuras equivalentes, ha significado doblar el número de líneas usadas típicamente en estudios restringidos a la región óptica. De la misma manera, 75 líneas de Ti I y Fe I, magnéticamente insensibles, han sido seleccionadas, junto con las bandas y de TiO, para el análisis de las enanas de tipo M con síntesis espectral (ver figura). Para evitar degeneraciones, se han impuesto *priors* en



Espectros modelo obtenidos con CARMENES de GX And (M1.0 V), la estrella de Luyten (M3.5 V) y la estrella de Teegarden (M7.0 V) en el canal óptico (panel superior) y en el canal infrarrojo (panel inferior). Las regiones sombreadas en azul y rojo denotan los rangos sintetizados para el análisis con STEPARSYN. Las regiones severamente afectadas de absorción telúrica en el canal infrarrojo se muestran rayadas y sombreadas en gris. El resto de las regiones sombreadas en gris marcan los huecos espectrales entre órdenes.

T_{eff} y $\log g$ basados en la información fotométrica multibanda disponible para la muestra. Además, con el objetivo de servir como punto de referencia para validar los resultados, se han destacado diferentes submuestras de especial interés, como las estrellas de referencia *Gaia*, los sistemas binarios FGK+M y M+M, así como las enanas de tipo M con medidas interferométricas del diámetro angular.

El código STEPAR ha demostrado ser una implementación robusta del método de anchuras equivalentes para el análisis de estrellas entre tipos F6 y K4. Como limitaciones del método, se requiere una relación señal-ruido mayor que 20 y una resolución espectral superior a 30000. Además, es necesario excluir binarias espectroscópicas, así como estrellas con velocidades de rotación superiores a 15 km s⁻¹.

El estudio del impacto de las líneas infrarrojas de Fe I y Fe II en la determinación de parámetros de estrellas de tipo FGK seleccionadas de la librería estelar de CARMENES ha revelado una escala en T_{eff} más profunda que parece estar vinculada a una mayor sensibilidad de estas líneas infrarrojas a T_{eff} . Sin embargo, la escasez de líneas de Fe II en la región infrarroja ha impedido un análisis que dependa de esta ventana únicamente.

La metodología empleada para el análisis de las enanas de tipo M ha resultado adecuada en el rango M0.0 V a M7.0 V, pero no más allá, debido a la escasez de líneas de Ti I y Fe I y a la insensibilidad de las bandas de TiO a T_{eff} . Aunque la escala de T_{eff} obtenida concuerda con las de la literatura, se observan grandes discrepancias entre las escalas de $[\text{Fe}/\text{H}]$. No obstante, hay congruencia con la distribución de metalicidad en el vecindario solar y buena correlación con la pertenencia cinemática de las estrellas a las poblaciones Galácticas. Además, se encuentra buena concordancia en T_{eff} para las enanas de tipo M con determinaciones interferométricas del diámetro angular, así como en $[\text{Fe}/\text{H}]$ entre las componentes en sistemas binarios FGK+M y M+M incluidos en la muestra.

Tesis disponible en: https://webs.ucm.es/info/Astrof/invest/actividad/tesis/tesis_EMarfil.html

Las relaciones de la formación estelar en galaxias luminosas en el infrarrojo

Autora: María Sánchez García
(mariasg_1993@hotmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Santiago García Burillo y Miguel Pereira Santaella
Centro: Universidad Complutense de Madrid
Fecha de lectura: 8 de marzo de 2022

La formación estelar tiene lugar en el interior de densas y frías nubes compuestas principalmente de gas molecular, denominadas nubes moleculares gigantes (GMCs). Su estudio en galaxias es en la actualidad objeto de gran interés, pues seguimos sin comprender en detalle cuáles son los mecanismos físicos que impulsan la formación de estrellas. Profundizar en este estudio es primordial para entender cómo se forman y evolucionan las galaxias.

Con el objetivo de comprender el proceso de la formación estelar en galaxias, en esta tesis hemos obtenido observaciones a escalas comparables a los tamaños de las nubes moleculares de galaxias caracterizadas por sus altas luminosidades infrarrojas. Estas galaxias son las denominadas galaxias luminosas en el infrarrojo (LIRGs). Comenzamos estudiando la galaxia NGC1068 que es una galaxia cercana ($D \sim 14 \text{ Mpc}$), espiral y barrada clasificada como Seyfert 2, que se caracteriza por tener un núcleo activo (AGN) y brotes intensos de formación estelar dispuestos en su anillo. Después extendemos el análisis a una muestra de 16 LIRGs locales ($14 \text{ Mpc} < D < 80 \text{ Mpc}$) que engloban diferentes morfologías: desde galaxias aisladas hasta objetos formados a partir de fusiones de galaxias. Hemos realizado este trabajo a partir de observaciones interferométricas a gran resolución angular de diferentes líneas moleculares en el rango de longitud de onda milimétrica. Además, hemos complementado estas observaciones con imágenes de la emisión de la línea Pa-alpha en el infrarrojo cercano. Nuestro trabajo ha estado enfocado principalmente al estudio de la ley de formación estelar, $\Sigma \text{SFR} \propto \Sigma \text{gas}^n$, cubriendo un amplio rango de densidades del gas molecular y escalas espaciales. Para realizar este estudio hemos llevado a cabo las observaciones y el análisis necesario para obtener las cantidades físicas con las que determinar las propiedades del gas y la tasa de formación de estrellas jóvenes. A partir del estudio de las relaciones de formación estelar en NGC1068, observamos la existencia de una cierta escala espacial, $\sim 300\text{-}400 \text{ pc}$, por debajo de la cual no se encuentra una correlación entre el gas y la tasa de formación estelar. A escalas mayores, sin embargo, se recupera la correlación. En la muestra de LIRGs encontramos que existe un comportamiento dual en la relación de formación estelar a escalas de 90 pc en el 25% de los objetos de la muestra. A medida que las escalas espaciales van aumentando, $250\text{-}500 \text{ pc}$, esta dualidad desaparece.

Una prescripción alternativa de las relaciones de formación estelar es la que relaciona la eficiencia de la formación estelar con la autogravedad del gas. Esta prescripción, junto con otras basadas en cantidades físicas como la dispersión de velocidad y la fracción de gas denso, muestra la importancia del entorno dinámico del gas a la hora de formar estrellas. En el caso de NGC1068, observamos que la interfaz barra-anillo potencia la formación estelar en esa zona. A distancias cada vez mayores

de dicha región, la formación de estrellas disminuye en el anillo. En el caso de la muestra de LIRGs encontramos que las regiones centrales de las galaxias con comportamiento dual son más eficientes con el aumento de la dispersión de la velocidad y la autogravedad del gas, en comparación con las regiones más externas de estas galaxias.

A partir de estos resultados encontramos que:

- La descripción canónica de las leyes de formación estelar donde la tasa de formación de estrellas depende exclusivamente de la cantidad de gas muestra claras desviaciones de un comportamiento universal: las relaciones de formación estelar dependen críticamente del trazador de gas utilizado, de la escala espacial, de la población de galaxias elegida y, dentro de cada galaxia, del entorno dinámico.
- Hay una dependencia de la eficiencia con la autogravedad del gas. Nuestras observaciones indican que una versión más universal de ley de formación estelar requiere de la inclusión de otras variables, no solo de la densidad de gas. El estado dinámico de la nube cambia y viene dictado por la dinámica a gran escala de la galaxia.
- Además, nuestros resultados muestran por primera vez claros indicios de bimodalidad encontrada en una fracción significativa de las galaxias extremas de nuestra muestra, que está asociada a la existencia de dos entornos dinámicos muy diferentes: las regiones centrales frente a las regiones externas de los discos.
- Nuestros resultados suponen una validación clave de los modelos de la formación estelar que dan gran importancia a la influencia del entorno a la hora de formar estrellas en las galaxias. Los resultados obtenidos en esta tesis motivan a seguir trabajando en:
- El estudio de las leyes de formación estelar en entornos dinámicos diferentes. En particular, es muy relevante averiguar la influencia que la actividad nuclear puede tener en la formación de estrellas en las galaxias.
- Encontrar cuáles son los mecanismos que explican la dualidad encontrada en las leyes de formación estelar en una parte de las galaxias extremas de la muestra de LIRGs. Aumentar el número de objetos de la muestra a partir de la realización de observaciones a gran resolución angular de diferentes líneas moleculares que incluyan un número significativo de objetos que cubran diferentes grados de actividad nuclear, presencia o no de brazos, y diferentes grados de interacción permitirá avanzar en ello.
- Validación y mejora de simulaciones y modelos. Este tipo de estudios proporcionan contrapartidas observacionales clave para validar las recetas implementadas en las simulaciones cosmológicas de la formación de galaxias que actualmente alcanzan resoluciones espaciales de algunas decenas de pc , comparables a escalas de las GMCs.

La relación litio-edad: Calibración con cúmulos abiertos y asociaciones

Autora: Marta Lúthien Gutiérrez Albarrán
(mlgutierrez@ucm.es)

Tesis doctoral dirigida por: David Montes
Gutiérrez

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 10 de mayo de 2022

El litio es un elemento muy frágil que se destruye fácilmente en los interiores estelares, disminuyendo lentamente con el tiempo en la superficie de estrellas de tipo solar y poco masivas. Por ello, el litio puede usarse para estudiar la evolución estelar y es particularmente relevante para determinar la edad de cúmulos estelares. Las abundancias de litio (derivadas de la línea de Li en $6707,76 \text{ \AA}$) para estrellas de tipo tardío dependen fuertemente de la edad, pero también muestran un patrón complejo que depende de diferentes parámetros, desde la rotación a la actividad cromosférica, la metalicidad o los mecanismos de mezcla. La mejor forma de poder calibrar estos efectos es analizando en detalle conjuntos de estrellas de la misma edad, como cúmulos abiertos y asociaciones estelares.

En esta tesis partimos de una muestra de 42 cúmulos abiertos y asociaciones observados por la exploración GES, en un rango de edades desde 1 Ma a 5 Ga, con el objetivo de estudiar el litio como indicador de edad para estrellas de tipos tardíos FGK en la presecuencia principal y secuencia principal, y de esta forma llegar a una calibración empírica de la relación Li-edad.

Este proyecto ha hecho uso de los datos proporcionados por el último lanzamiento de datos de GES (iDR6) y por *Gaia* EDR3. *Gaia*-ESO (GES) es una gran exploración espectroscópica pública que proporciona una visión homogénea de la distribución de la cinemática y la estructura dinámica y química de la Galaxia. GES ha tomado datos de una gran cantidad de estrellas y de casi 100 cúmulos estelares, usando el espectrógrafo multiobjeto FLAMES del *Very Large Telescope* (ESO, Chile) para obtener tanto espectros de alta resolución con UVES como de resolución media con GIRAFFE.

En primer lugar, hemos realizado un detallado análisis de pertenencia para obtener listas de estrellas candidatas para cada uno de los 42 cúmulos, utilizando todos los parámetros disponibles y basándonos en los siguientes criterios: primero llevamos a cabo un estudio cinemático de las distribuciones de velocidades radiales, combinado con el análisis de los movimientos propios y las paralajes proporcionadas por *Gaia*. Se utilizan indicadores de gravedad como $\log g$ y el índice y para descartar contaminantes gigantes de campo y de esta forma obtenemos, como resultado paralelo, un número de gigantes ricas en Li que listamos por su interés. Reforzamos las selecciones astrométricas utilizando la fotometría de *Gaia* en diagramas color-magnitud y usamos la metalicidad $[\text{Fe}/\text{H}]$ para descartar contaminantes adicionales. Con todo esto, estudiamos las candidatas en diagramas de $\text{EW}(\text{Li})$ frente a T_{eff} y obtenemos listas finales de candidatas.

Todos estos análisis de pertenencia se han complementado con una minuciosa búsqueda bibliográfica para cada cúmulo, recopilando todos los datos previos sobre abundancias de Li, estimaciones de edades, velocidades, astrometría, metalicidades y estudios previos de pertenencia. Las selecciones preliminares de candidatas para 20 de los cúmulos de la muestra

también se publicaron en 2020 en un artículo de A&A, al que se puede acceder en [este enlace](#).

Obtenidas las selecciones de candidatas, hemos llevado a cabo un estudio comparativo para poder cuantificar las dispersiones de Li observadas en cada cúmulo y analizar su dependencia con diferentes parámetros: rotación, indicadores de acreción, actividad cromosférica y metalicidad. Para el estudio de la rotación usamos tanto las velocidades de rotación proporcionadas por GES ($v \sin i$), como una serie de períodos de la literatura, incluyendo datos de TESS, K2 y Kepler. Hemos estudiado y confirmado varias correlaciones y comportamientos descritos en la literatura: observamos, por ejemplo, que candidatas con más litio tienden a ser más rápidas rotadoras y usualmente también son más activas. Por último, hemos observado cómo la metalicidad puede influir en el nivel de disminución de Li para cúmulos de las mismas edades, según sean más o menos metálicos.

Con toda esta información pasamos a la última parte del proyecto, la de calibrar una relación Li-edad. Para ello hemos creado una serie de envolventes empíricas de litio para edades claves en nuestra muestra, desde unos pocos Ma a varios Ga. Para obtener envolventes de la manera más completa posible, hemos delimitado también la zona de la LDB (el límite de disminución de litio) para los cúmulos con edades de 15-500 Ma con ayuda de varios modelos. Una aplicación de estas envolventes a la hora de usar el litio como indicador de edad es poder representar estrellas de edad desconocida en diagramas de $\text{EW}(\text{Li})$ frente a T_{eff} y usarlas como guía para estimar sus edades.

Como trabajo futuro, tenemos como objetivo principal utilizar esta relación Li-edad y las envolventes que hemos obtenido para poder estimar las edades de estrellas de campo observadas por GES cuya edad es aún desconocida, y así poder confirmar su pertenencia a diferentes grupos cinemáticos estelares de diferentes edades. Otro punto de interés es el estudio de las gigantes ricas en litio observadas en el campo de estos cúmulos durante el análisis de pertenencia, dada la naturaleza excepcional de estas estrellas y su utilidad a la hora de entender el comportamiento del litio estelar.

Tesis disponible en: <https://drive.google.com/drive/folders/1HiSBFfc30hMHubOZFzVUU5uWSTXQIJQ>

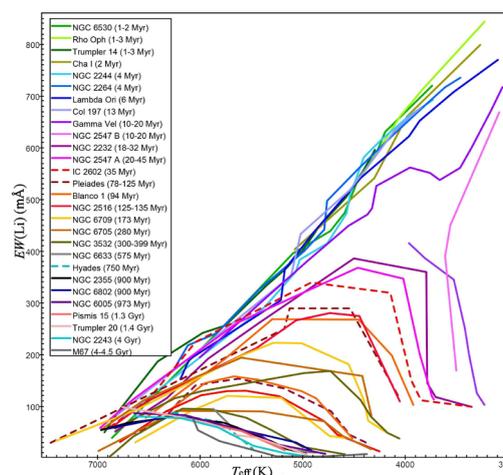


Diagrama de $\text{EW}(\text{Li})$ frente a T_{eff} mostrando las envolventes de Li empíricas obtenidas para 27 de los 42 cúmulos de la muestra, incluyendo los cúmulos jóvenes (1–50 Ma), así como los de edad intermedia (50–700 Ma) y los cúmulos viejos (> 700 Ma). Estas figuras también incluyen las envolventes de Li que se han usado a lo largo de esta tesis, mostradas en líneas discontinuas: La envolvente superior de $\text{EW}(\text{Li})$ para el cúmulo IC 2602 (35 Ma), mostrado en rojo; las envolventes superior e inferior para el cúmulo de las Pléyades (78–125 Ma), mostradas en rojo oscuro; y la envolvente superior para el cúmulo de las Híades (750 Ma), en turquesa.

Blue jet observado desde la Estación Espacial Internacional
captado por las cámaras y fotómetros del experimento ASIM
a bordo de la misma.



**Sociedad Española
de Astronomía**

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

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