

# 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.

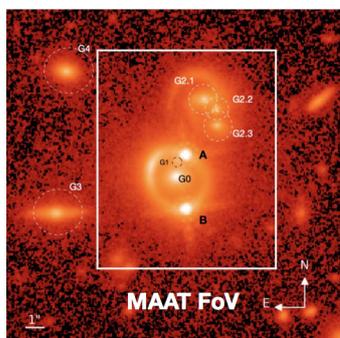
El espectrógrafo OSIRIS es, con diferencia, el instrumento más demandado del GTC. Aproximadamente el 40% del tiempo ( $\sim 700$  horas por año) se asignan a la observación de propuestas para utilizar el modo de rendija larga de OSIRIS. El objetivo de MAAT en OSIRIS es añadir el modo de espectroscopía 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)

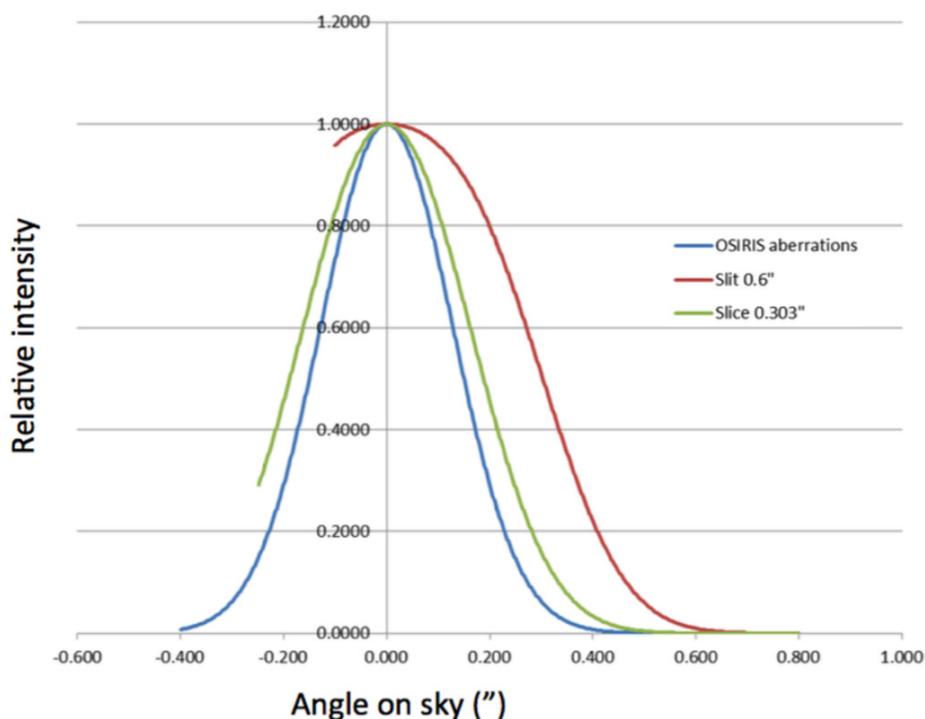
Parameter	Value
Spectrograph	OSIRIS
Module	Integral Field Unit
Field-of-View	12.0'' × 8.5''
Field aspect ratio	1.42
Slice width	0.303''
Spatial sampling	0.303'' × 0.127''
Wavelength range	360 to 1000 nm
Spectral resolution	600 to 4100
Detector	4k × 4k (15 μm pixel)
CCD plate scale	0.127'' per pixel

ID	$\lambda_c$ (Å)	$\Delta\lambda$ (Å)	D (Å/pix)	R (LS <sup>1</sup> )	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

<sup>1</sup>Resolving 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  $1 \times 2$ . 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

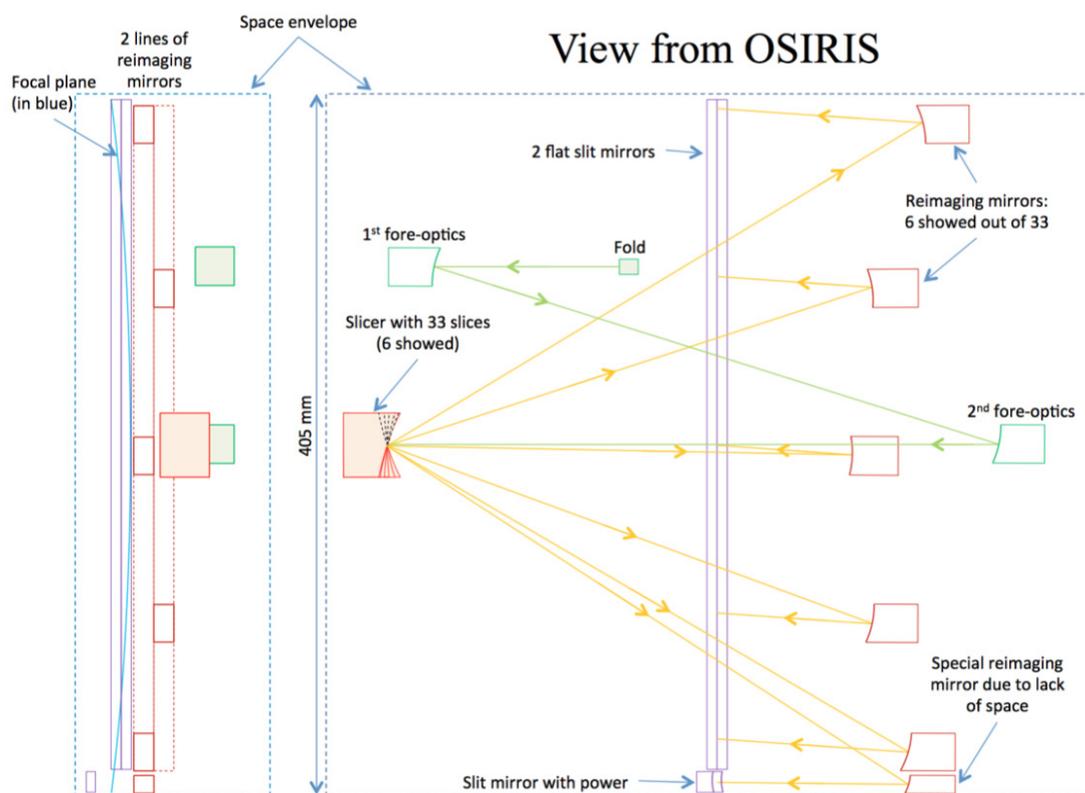


Figura 3. *Sketch* simplificado con el diseño óptico de la unidad de campo integral de MAAT.

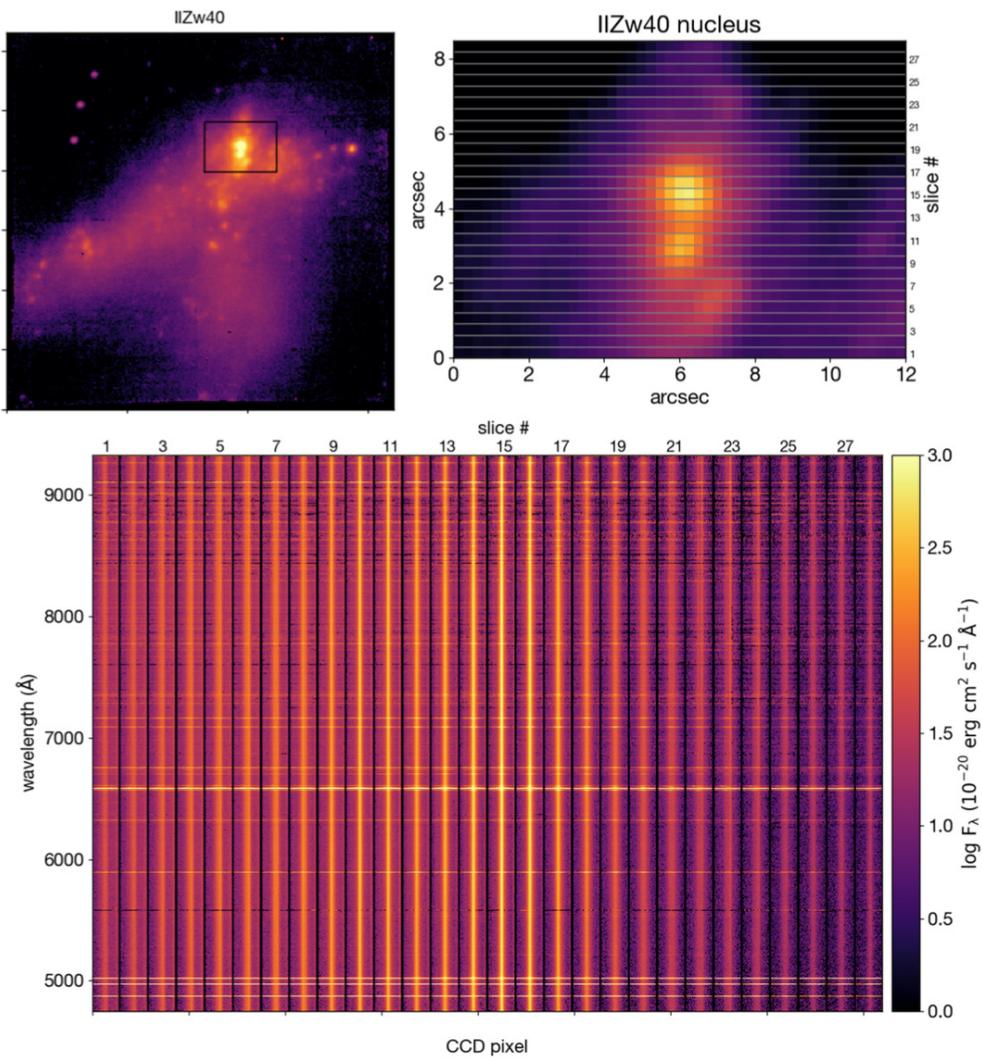


Figura 4. Imagen espectral del núcleo de IIZw40 visto por MAAT@GTC.

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  $480 \text{ nm}$ ). 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.

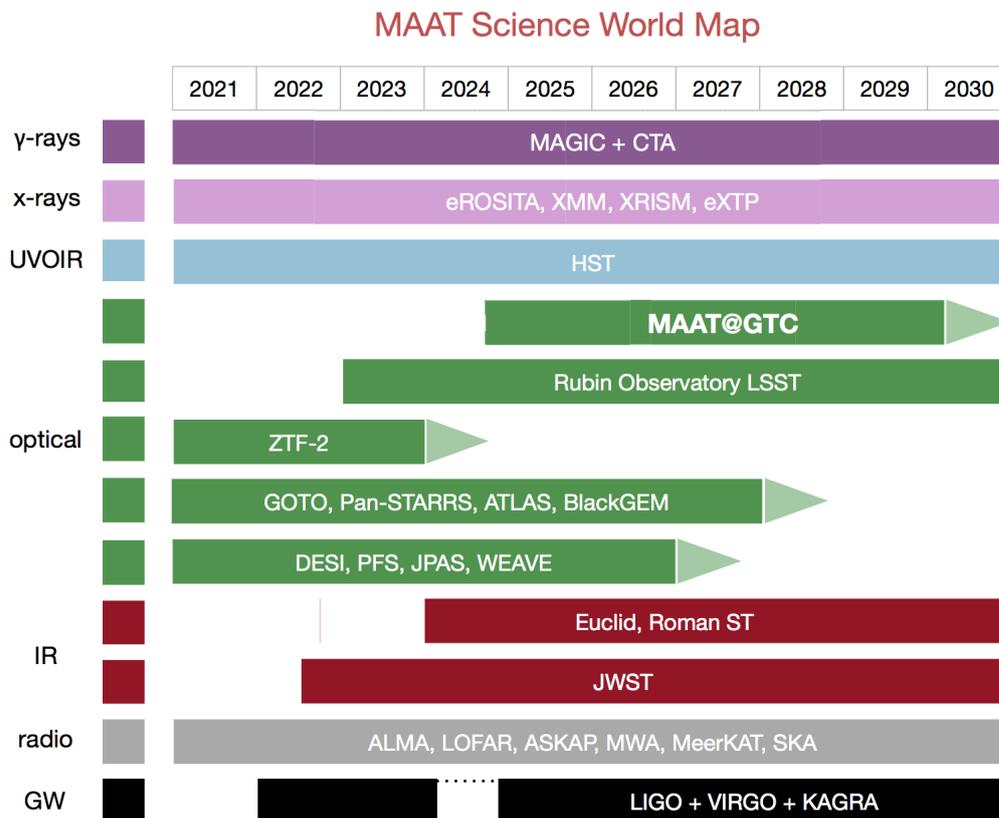
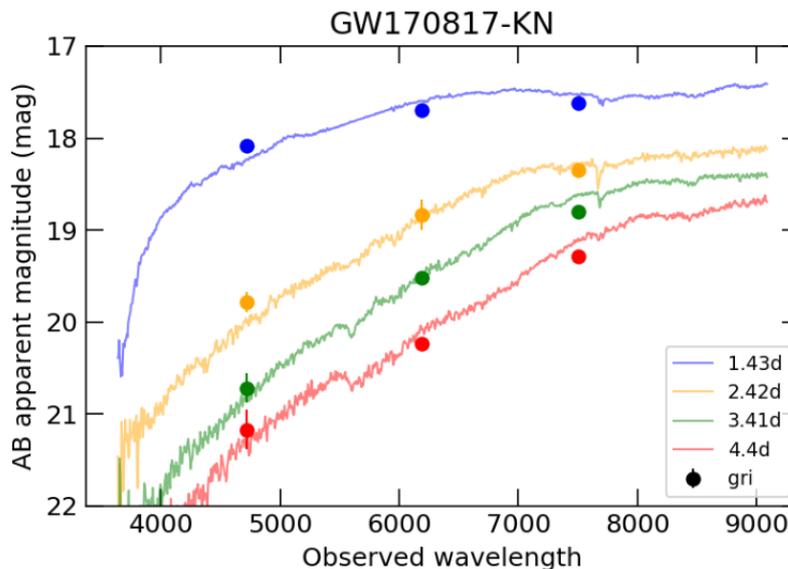


Figura 6. Serie temporal de los espectros de la Kilonova GW170817 si hubiera sido observada con MAAT+OSIRIS con las redes R1000B y R1000R y 30 minutos por época.



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.

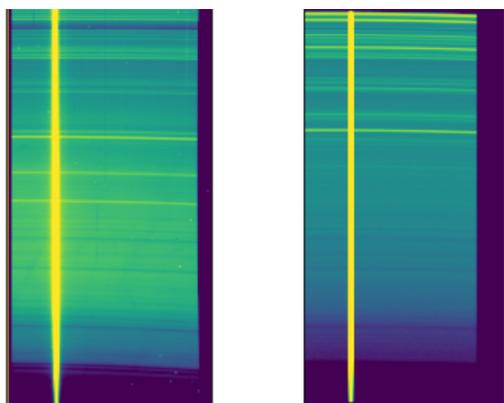
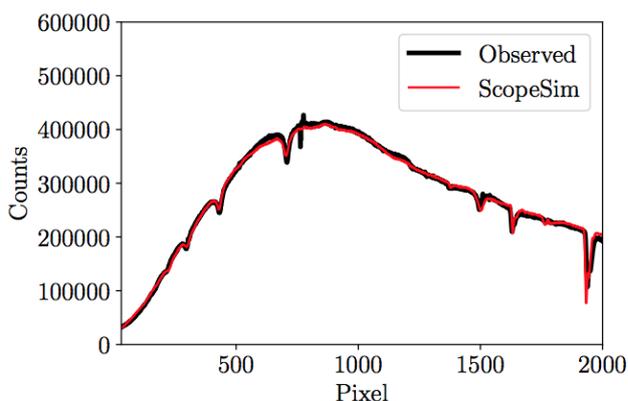


Figura 7. Simulación de la observación de la estrella estándar G191-B2B con el modo long-slit de OSIRIS con una anchura de 2.52" y la red R1000B. ScopeSim reproduce bien las observaciones.

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-

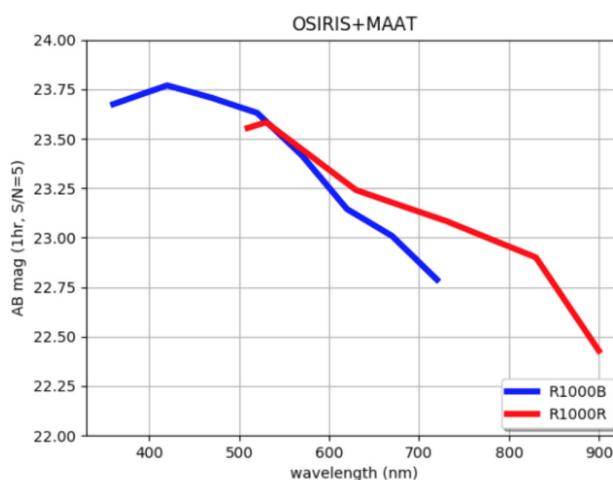


Figura 8. Magnitud límite de MAAT+OSIRIS con las redes R1000B y R1000R para 1 hora y S/N=5.

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 ( $\text{erg/cm}^2/\text{s}/\text{\AA}$ ). [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<sup>a</sup> Ángeles Pérez-García, Carlos Domínguez, Eduardo Martín, David Jones y Enrique Pérez.

