

Principales aspectos Anexo Técnico

DETECTORES SPADs

Francisco Prada
Instituto Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)

El **Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA)** es un centro del **Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)**. Su misión es la de profundizar en el conocimiento del cosmos y acercar éste a la sociedad haciendo investigación en Astrofísica, Ciencias del Espacio y desarrollo Tecnológico de vanguardia.

Es un **centro Severo Ochoa** y **uno de los mayores centros de investigación del CSIC** con casi 300 integrantes. Por su producción científica, es el segundo centro español en el área de Astrofísica y el séptimo entre los centros del CSIC en cualquiera de sus áreas de investigación.

Website: <https://www.iaa.csic.es/>

Necesidad del reto

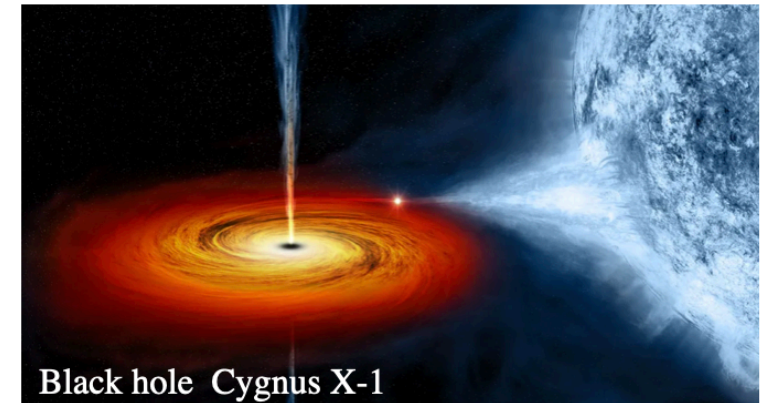
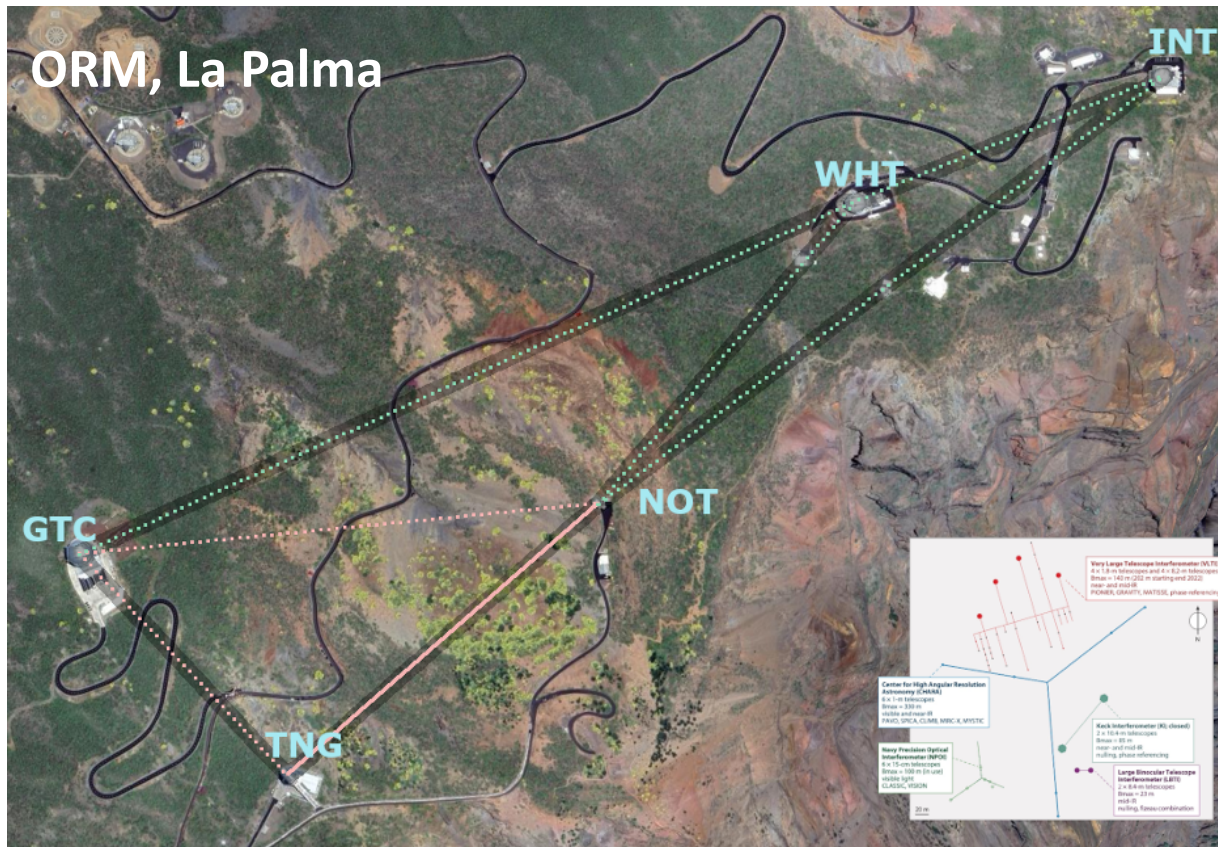
El proyecto del **Interferómetro de La Palma** (<https://lapalmaqi.es/>) tiene la necesidad de implementar nuevas tecnologías para observar el universo de una forma muy especial: usando interferometría de intensidad en luz visible. Para ello, se utilizarán **cinco telescopios ópticos a la vez**, separados hasta 1,5 km entre sí, en el **Observatorio del Roque de los Muchachos** (ICTS Observatorios de Canarias), en la isla de La Palma.

En estos telescopios se instalarán espectrógrafos equipados con detectores basados en **microchips SPAD (objetivo del reto)**, siendo capaz de alcanzar una resolución espacial de hasta 50 microsegundos de arco, es decir, poder distinguir detalles extremadamente pequeños en el cielo, **unas mil veces mejor que el telescopio espacial Hubble**.

El objetivo científico es conocer cómo se comporta la materia en condiciones extremas: por ejemplo, estudiando los discos de acreción de los agujeros negros, fenómenos ultrarrápidos o incluso descubrir nuevos exoplanetas.

El interferómetro desarrollará un programa de ciencia y tecnología de carácter claramente **transdisciplinar**, conectando astronomía, física, ingeniería y nuevas tecnologías.

Necesidad del reto

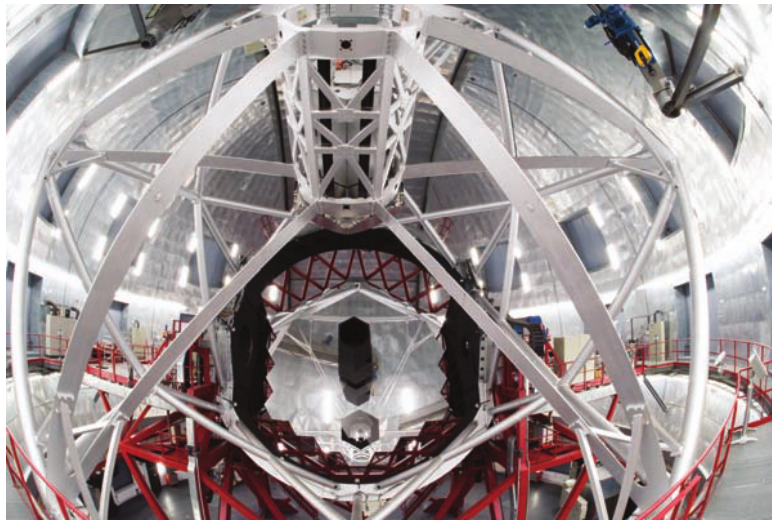


Objetivo del reto

- El **objetivo** de esta iniciativa es avanzar en la **tecnología SPAD** con la finalidad de abrir nuevos horizontes en la astronomía, de tal manera que se pueda observar y estudiar eventos ultrarrápidos y fenómenos transitorios, así como permitir la implementación de la técnica de interferometría de intensidad utilizando varios telescopios ópticos separados entre sí, para alcanzar resoluciones espaciales en el rango de los microsegundos de arco.
- La solución demandada es el desarrollo de un detector SPAD de nueva generación y una cámara con dicho detector, que se instalará en el Gran Telescopio Canarias (GTC).
- Para conseguir este objetivo se espera que las propuestas aprovechen las tecnologías de apilado 3D con iluminación trasera (BSI).
- El detector SPAD y la cámara deberán adecuarse a los requisitos técnicos y funcionales establecidos, así como a la normativa aplicable y requisitos de conformidad, mantenimiento o seguridad, incluyendo un desarrollo tecnológico que permita aumentar el TRL, desde un TRL inicial 4 – 5 a un TRL final de 7.

Requisitos técnicos de la solución

- El prototipo es un detector de fotones individuales en el rango visible del espectro consistente formado por un array monolítico de SPADs (*Single Photon Avalanche Diode*). Cada pixel del array es un sensor SPAD individual.
- El prototipo irá integrado en una cámara de imagen que se instalará y verificará en el Gran Telescopio Canarias (GTC).



Requisitos técnicos del detector SPAD

- **Tecnología CMOS 3D BSI**

La tecnología CMOS ha de ser apilada en 3D, con iluminación trasera (*BSI, Back Side Illuminated*).

- **Eficiencia de detección de fotones (PDE, *Photon Detection Efficiency*)**

En el rango espectral de trabajo (350 nm - 1000 nm) la PDE ha de tener los siguientes valores mínimos: 15% a 370 nm, 45% a 550 nm, 20% a 900 nm.

- **Resolución temporal total (FWHM, *Full Width at Half Maximum*)**

La anchura a media altura (FWHM) de la resolución temporal total ha de ser menor de 170 picosegundos.

- **Formato**

El detector monolítico tendrá un formato mayor que 15 mm x 15 mm = 225 mm².

- **Factor de llenado**

El factor de llenado ha de ser mayor del 80% sin uso de microlentes.

Si fuera menor del 95% (pero siempre mayor de 80%) entonces tendrá que incluirse un array de microlentes (independiente del detector SPAD) que forme parte de la óptica de la Cámara de imagen para conseguir un factor de llenado del 100%.

Requisitos técnicos del detector SPADs

- **Forma y Tamaño de pixel**

La forma de cada pixel será cuadrada.

Cada pixel tendrá un lado cuyo tamaño estará comprendido entre 10 μm y 30 μm .

- **Corriente de oscuridad**

La mediana de la corriente de oscuridad del detector SPAD, medida a una temperatura del detector de -20 $^{\circ}\text{C}$, ha de ser menor que 0.01 cuentas por segundo por μm^2 .

- **Ruido de lectura (RON)**

El ruido de lectura ha de ser 0 (cero) electrones.

- **Rango espectral de detección de fotones**

El rango espectral de detección de los fotones es desde 350 nm hasta 1000 nm.

- **Forma del perfil de la respuesta temporal de un SPAD**

La forma del perfil de la respuesta temporal tiene, además del jitter FWHM, una caída exponencial que se caracteriza por la Full Width a 0.1 del Máximo (FW1/10M) y la Full Width a 0.01 del Máximo (FW1/100M). Estos valores han de ser menor de 0.85 ns para FW1/10M y 2.15 ns para FW1/100M.

Requisitos técnicos del detector SPADs

- **Tiempo muerto de un SPAD**

El tiempo muerto de cada uno de los SPADs ha de ser menor de 10 ns.

- **Probabilidad de detección espúrea (Afterpulsing probability)**

La probabilidad de detección espúrea de eventos tras el pulso principal ha de ser $<1\%$, a la temperatura $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- **Tasa máxima de conteo de eventos**

La tasa máxima de fotones ha de ser mayor de 250 Mcps para el detector completo y de 75 Mcps para un pixel.

- **Linealidad**

La linealidad ha de ser mejor que el 1% en el rango de tasa de eventos por pixel entre 0.001 Mcps y 15 Mcps.

Se define la linealidad como la relación lineal en el plano log-log entre el número de fotones que llegan a un pixel y el número de eventos que son detectados, .

- **Píxeles defectuosos**

La fracción total de los píxeles defectuosos (no funcionales, incluidos píxeles calientes, píxeles muertos, y su distribución) del detector ha de mantenerse por debajo del 5%. Estos han de estar distribuidos de tal manera que habrá menos de 0.1% que estén en grupos de más de 6 píxeles, y menos del 2% con más de 1 pixel.

Requisitos técnicos del detector SPADs

- **Crosstalk**

El valor del crosstalk ha de ser menor de 1%.

- **Temperatura de funcionamiento**

La temperatura de funcionamiento del detector SPAD debe de estar entre -40 °C y +60 °C.

- **Lectura de regiones de interés (ROI) del detector y submuestreo de datos**

Se permitirá la lectura de una o varias regiones de interés en número, tamaño y forma arbitrarias; esto incluye el caso especial de submuestreo de datos espacial (pixel decimation).

- **Desactivado de píxeles y/o regiones**

Se permitirá la desactivación funcional de un número indefinido de píxeles individuales y/o de zonas con más de un pixel arbitrariamente especificadas por la posición XY de sus píxeles.

- **Encapsulado**

Los detectores han de estar encapsulados en una ventana de protección cerámica que permita despegar la capa de vidrio protectora.

Requisitos técnicos del detector SPADs

- **Formato de los datos de salida.**

El formato y capacidad en bits de los datos de salida ha de acomodar tanto las coordenadas X e Y del tamaño del detector como el sello temporal (timestamp).

Para el timestamp tendrá que acomodar la tasa máxima de conteo de eventos del detector completo (ver requerimiento m). Una vez alcanzado el máximo, el timestamp se reinicia a cero.

Los datos han de estar en un formato que permita su lectura con software libre.

- **Modo de lectura**

Modos de lectura: lectura por eventos (asynchronous readout) y modo imagen 2D (frame).

Ambos modos de lectura han de permitir especificar un tiempo de integración arbitrario.

- **Sello temporal por pixel (Timestamping per pixel)**

La electrónica de lectura ha de proporcionar un sello temporal por pixel (Timestamping per pixel) para cada evento detectado.

- **Potencia**

La potencia consumida por el detector ha de ser tal que, teniendo en cuenta la capacidad de refrigeración del sistema Peltier y operación en vacío de la Cámara, la tasa de corriente de oscuridad del detector SPAD y demás requerimientos del detector se mantengan dentro de los límites especificados en esta sección de requerimientos.

Requisitos técnicos de la cámara

Características funcionales

Debe permitir la adquisición de imágenes en el rango espectral entre 360 nm y 1000 nm, usando filtros anchos, estrechos y sin filtro

Los filtros se ubicarán en el haz colimado y se montarán en una rueda de filtros u otro mecanismo equivalente de inserción de filtros, siendo las características de los filtros

- Filtros anchos: Cuatro filtros del sistema SDSS – g, r, i, z
- Filtros estrechos: Dos filtros estrechos con respuesta cuadrada (top-hat) y anchura (FWHM) de 1nm, centrados en 400 nm y 656.28 nm.
- Todos los filtros deberán adquirirse a la compañía japonesa Asahi Spectra Co.
- El mecanismo de filtros contará con un total de 7 posiciones, una de las cuales permanecerá vacía para permitir el paso del haz sin filtro.

Requisitos técnicos de la cámara

Con relación a las **características ópticas** de la cámara, a modo de guía, se considera un detector con píxeles de 20 micras y un área de 20 mm x 20 mm (es decir, 1000 x 1000 píxeles).

Características ópticas	
Escala de placa	0.3 arcsec por pixel
Campo de visión (FoV):	300 arcsec x 300 arcsec
<ul style="list-style-type: none">• Óptica basada en lentes con recubrimientos para maximizar la eficiencia UV.• Las lentes se fabricarán a temperatura ambiente (+20 °C) y se utilizarán a -20 °C.• Todas las superficies ópticas y mecánicas evitan la luz dispersa y difusa.• Número óptimo de bafles (deflectores) entre los elementos o grupos de elementos ópticos.	

Requisitos técnicos de la cámara

La cámara **operará** en dos modos distintos:

Modo operación	Descripción
Imagen directa	<ul style="list-style-type: none">-Utiliza el espejo primario completo (10,4 m)-Emplea los filtros anchos SDSS y sin filtro-Relación focal (f/#): 1,32-PSF RMS: $< 0,24$ arcsec, equivalente a $< 16 \mu\text{m}$ en el detector
Imagen interferométrica de intensidad	<ul style="list-style-type: none">-Se generan 36 imágenes independientes, una por cada segmento del M1-Cada imagen corresponde a un espejo-segmento de 1,5 m de diámetro-Relación focal (f/#): 9,3-Área del detector utilizada: 62×65 píxeles en el centro del detector- as-designed PSF RMS: $< 0,0075$ arcsec, equivalente a $< 0,5 \mu\text{m}$ en el detector.

Requisitos técnicos de la cámara

Condiciones de operación	
Temperatura	Rango de temperatura operativa: de -40 a 25 °C Tasa de temperatura operativa: $0,3$ °C por hora Temperatura de supervivencia: de -40 a 60 °C
Humedad	0%-98%
Altitud sobre el nivel del mar	2.300 m
Vida útil de todos los materiales (resistente a la corrosión)	10 años
Posición respecto a la gravedad	Cualquiera
Resistencia a la vibración	Survival to vibration ($G = -9.81$ m/s ²): <ul style="list-style-type: none"> Static Gravity in any direction: ± 1 G for $f < 0.005$ kHz, any combination of 3 axis (X, Y, Z) sine acceleration: $\pm (1 + 0.3 f)$ G for f from 0.005 to 0.04 kHz, any combination of 3 axis (X, Y, Z) sine acceleration: ± 2.5 G for f from 0.04 to 1.0 kHz, any combination of 3 axis (X, Y, Z) sine acceleration: $\pm 2.6 (1 - f)$ G

Requisitos conformidad

Todo el equipamiento - incluidos los detectores SPAD, la electrónica de lectura, la criogenia y la Cámara SPAD para la observación astronómica (con sus elementos ópticos y mecánicos, el detector y la electrónica de lectura integrados y el software de control y adquisición de datos)- deberá cumplir con las normas en materia de diseño, fabricación, seguridad eléctrica, compatibilidad electromagnética y gestión de calidad:

- Estándares de la Organización Internacional de Normalización (ISO)
- Estándares de la ISO y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) para productos, servicios y procesos.
- Estándares de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) para garantizar la seguridad, fiabilidad y compatibilidad de productos y sistemas eléctricos y electrónicos
- Estándares de dispositivos semiconductores (Joint Electron Device Engineering Council (JEDEC))
- Estándares de compatibilidad electromagnética
- El apantallamiento del equipamiento deberá cumplir con las normas aplicables de emisión e inmunidad electromagnética y garantizar la conformidad del sistema con los requisitos de compatibilidad electromagnética.

Fases/subfases

FASE I: DISEÑO

Fase/Subfase	Fase I (5meses)				
	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5
Justificación/certificación				J.I	C.I

La Fase I cubrirá el diseño conceptual de todos los componentes que conforman el prototipo de detectores SPADs, incluida la cámara óptica.

[A1.1] Gestión y control económico

[A1.2] **Diseño conceptual** de:

- detector SPAD
- cámara óptica
- integración

identificando puntos críticos, requisitos y especificaciones del demostrador

[A1.3] Definición de testeo de la versión de pruebas y prototipo final

Fases/Subfases

FASE II: DESARROLLO DE PROTOTIPO

La Fase II comprende el desarrollo e implementación funcional de todos los componentes, tanto del Detector SPADs como de la cámara, así como la integración de ambos, conforme al diseño conceptual elaborado en la Fase I.

Fase/Subfase	Fase II																											
	Subfase II.1 (14 meses)														Subfase II.2 (14 meses)													
Mes	M6	M7	M8*	M9	M10	M11*	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	M22*	M23	M24	M25	M26*	M27	M28	M29	M30	M31	M32	M33
Justificación/certificación			J.II.1.H1	C.II.1.H1		J.II.1.H2	C.II.1.H2						J.II.1	C.II.1			J.II.2.H1	C.II.2.H1			J.II.2.H2	C.II.2.H2					J.II.2	C.II.2
			Fechas meramente orientativas			Fechas meramente orientativas											Fechas meramente orientativas				Fechas meramente orientativas							

Subfase II.1 de Diseño preliminar y versión de pruebas

Comprende el diseño y desarrollo de una **versión funcional reducida** (detector de pruebas que valide la arquitectura 3D BSI, los modelos ópticos y eléctricos, y el proceso de bonding) antes de proceder con el diseño final.

[A2.1] Gestión y control económico de la Subfase II.1

[A2.2] **Diseño preliminar** del detector SPAD, de la cámara óptica y de la integración

[A2.3] Desarrollo de la versión de pruebas del detector SPAD

[A2.4] Testeo de la versión de pruebas

Fases/Subfases

Subfase II.2 de Diseño final y prototipo (14 meses).

Comprende el diseño y desarrollo tanto del detector, de las capas SPAD y ASIC, y su apilado mediante bonding, como de su electrónica de Readout, la cámara y la integración de ambos.

[A2.5] Gestión y control económico Subfase II.2

[A2.6] **Diseño final** del detector SPAD, de la cámara óptica y de su integración

[A2.7] Desarrollo del detector SPAD, de la cámara óptica. Integración

[A2.8] Testeo de cámara óptica con detector SPAD

Fases/Subfases

FASE III: VERIFICACIÓN PRE-OPERACIONAL

Fase/Subfase	Fase III (3+1=4 meses)			
Mes	M34	M35	M36	M37
Justificación/certificación			J.III	C.III

La cámara con detector SPAD se instalará en uno de los *folded Cassegrain* del Gran Telescopio Canarias (GTC) para que se puedan desempeñar las tareas de observación de astronómica

[A3.1] Gestión y control económico

[A3.2] **Instalación y configuración** de la cámara óptica con detector SPAD en el telescopio Gran Telescopio Canarias

[A3.3] Pruebas y **verificación** de la cámara para la observación astronómica

Presupuesto

Presupuesto base de licitación: **11.977.475,85 € (+IVA)**

Fase	Subfase	Nº máximo adjudicatarios por fase/Subfase	Importe máximo de la oferta de cada licitador (sin IVA)	Importe máximo por fase/subfase (sin IVA)	IVA (21%)	Importe máximo por fase/subfase (con IVA)
I		3	574.245,60 €	1.722.736,80 €	361.774,73 €	2.084.511,53 €
II	II.1	1	3.077.579,25 €	3.077.579,25 €	646.291,64 €	3.723.870,89 €
	II.2		7.068.700,80 €	7.068.700,80 €	1.484.427,17 €	8.553.127,97 €
III		1	108.459,00 €	108.459,00 €	22.776,39 €	131.235,39 €
TOTAL			10.828.984,65 €	11.977.475,85 €	2.515.269,93 €	14.492.745,78 €

Entregables

Fase/Subfase		Entregables
I. DISEÑO		ES1.1 Documentación relativa a la gestión
		ES1.2 Diseño conceptual
		ES1.3 Testeo
II	II.1 Diseño preliminar y versión de pruebas	ES2.1 Documentación relativa a la gestión Subfase II.1
		ES2.2 Diseño Preliminar
		ES2.3 Documentación relativa al desarrollo de la versión de pruebas
		ES2.4 Resultados correspondientes al testeo la versión de pruebas
	II.2 Diseño final y prototipo	ES2.5 Documentación relativa a la gestión Subfase II.2
		ES2.6 Diseño Final
		ES2.7 Prototipo y documentación
		ES2.8 Resultados correspondientes al testeo de los detectores SPAD y la Cámara óptica
III. VERIFICACION PREOPERACIONAL		ES 3.1. Documentación relativa a la gestión
		ES 3.2 Documentación acreditativa de la correcta instalación del sistema en el GTC
		ES 3.3 Resultados de las pruebas de verificación



INSTITUTO DE
ASTROFÍSICA DE
ANDALUCÍA



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



+info sobre programas y ayudas CDTI para proyectos de I+D empresarial e innovación



@CDTI_innovacion



Cofinanciado por
la Unión Europea



MINISTERIO
DE HACIENDA



Fondos Europeos

Nota: En caso de discrepancia entre la información de la presentación y el pliego, prevalece éste.