

# Explotación científica innovadora de telescopios Cherenkov: Interferometría de Intensidad

Irene Jiménez Martínez

Directores:  
Juan Cortina Blanco  
Carlos José Delgado Méndez  
Tarek Hassan Collado



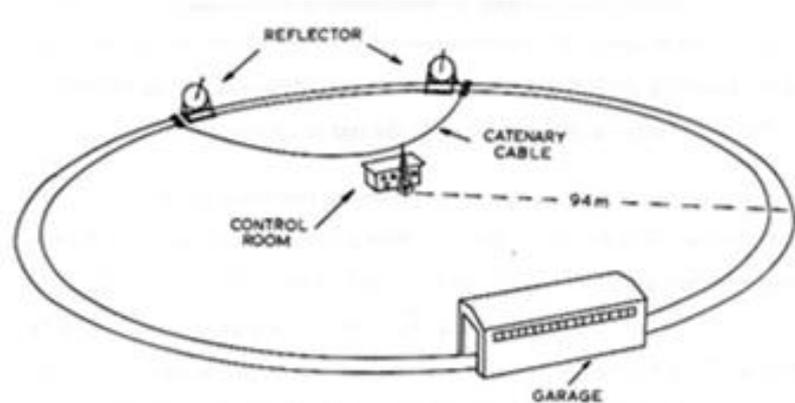
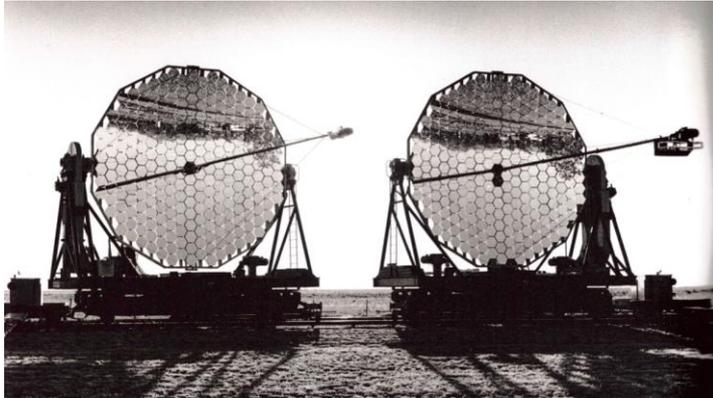
Jornadas de Doctorandos UCM - Abril 2021



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

# Un poco de historia: Narrabri Stellar Intensity Interferometer

- Diseñado por Hanbury Brown y Richard Q. Twiss.
- Construído en New South Wales (Australia).
- Dos telescopios de 6.5m de diámetro.
- Los movían para medir a diferentes distancias (baselines) entre 10m y 188m.
- Midieron el diámetro de 32 estrellas entre 1963 y 1974.
- Su técnica fue superada por la interferometría de fase porque se necesitaban espejos muy grandes.

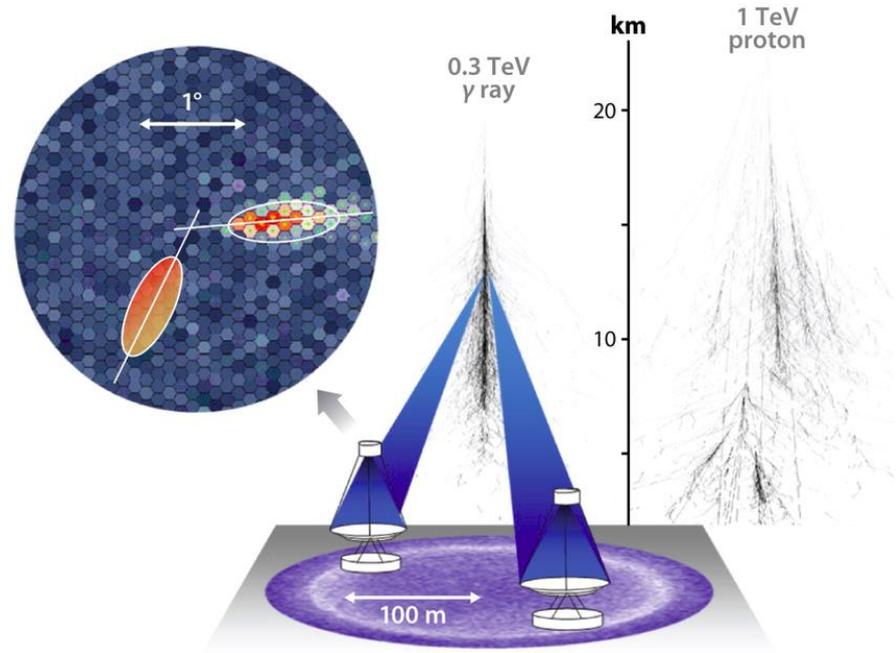


# ¿Cómo funciona un telescopio Cherenkov (IACT)?

Los IACTs (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes) son telescopios dedicados a observar Cascadas Electromagnéticas Extensas.

Dichas cascadas producen luz Cherenkov del orden de nanosegundos, que es un tipo de radiación electromagnética que se produce cuando una partícula cargada se mueve a través de un medio dieléctrico a una velocidad mayor que la de la luz en dicho medio.

La caracterización de dicha luz Cherenkov producida por cada Cascada Electromagnética Extensa nos permite reconstruir y estudiar la naturaleza, dirección y energía de la partícula primaria.



# Características de telescopios Cherenkov ideales para la técnica de Interferometría de intensidad

**Grandes superficies reflectoras:** cuando se produce coherencia la señal aumenta un  $\sim 0.01\%$ , por lo que se necesita muchísima estadística (fotones).

**Sensibilidad a fotones individuales:** ya que queremos medir la coherencia de la intensidad a partir del tiempo de correlación de los fotones recibidos. Para esto también ayuda el diseño óptico de estos telescopios, dedicado a preservar la isocronicidad de los fotones para mejorar la sensibilidad a rayos gamma.

**Resolución temporal del orden de nanosegundos:** para poder resolver el pico de correlación, cuya anchura es de unos pocos nanosegundos. Estos telescopios están equipados con cámaras que miden en frecuencias de GHz.

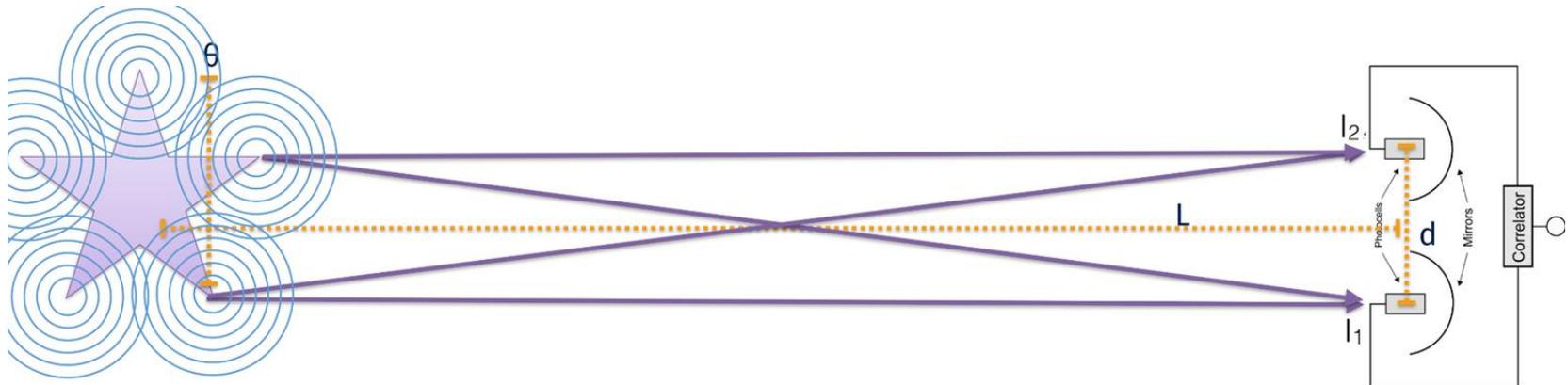
**Vienen en grupos:** para reconstruir la dirección de las cascadas atmosféricas se colocan varios telescopios para ver la misma cascada desde diferentes ángulos. Esto proporciona a la interferometría de intensidad diferentes posiciones (baselines) desde las que detectar la coherencia.

# ¿En qué consiste la técnica la Interferometría de Intensidad?

Un objeto brillante de tamaño angular  $\theta$  está formado por muchas regiones que emiten de forma incoherente formando un patrón de tamaño  $\lambda/\theta$ .

Si la distancia entre 1 y 2 es  $\ll \lambda/\theta$ , entonces 1 y 2 observan las mismas fluctuaciones.

La interferometría de fase/amplitud mide la correlación en amplitud mientras que esta técnica mide la correlación en intensidad.

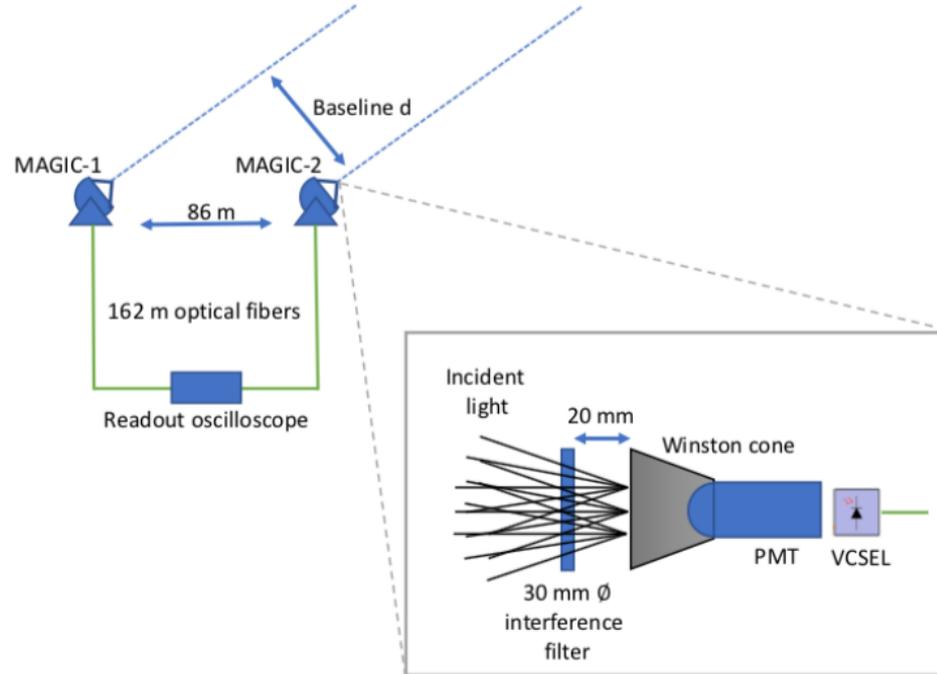


# ¿En qué consiste la técnica la Interferometría de Intensidad?

La correlación entre las fluctuaciones de intensidad nos permite medir la coherencia espacial o visibilidad.

Si medimos la visibilidad a lo largo de un rango suficiente de distancias entre 1 y 2 (baselines) podemos construir una imagen de la fuente.

La mayoría de las estrellas tienen un diámetro angular de  $< 1$  milisegundo de arco por lo que resolverlas requiere baselines de cientos de metros a longitudes de onda ópticas.

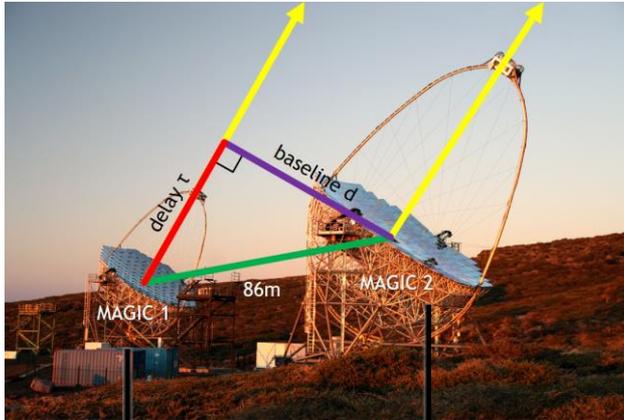


# Telescopios MAGIC

- Situado en el Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma).
- Dos IACTs de 17m de diámetro a una distancia fija de 86m..
- Sensible a rayos gamma entre 25GeV y 30TeV.



# Interferometría de intensidad con MAGIC



162m de fibra óptica

Correlador

Coefficiente de correlación de Pearson  $\rho$

- Coeficiente de correlación de Pearson  $\rho$
- Delay  $\tau$
- Fluctuaciones estadísticas de la luz de la estrella (DC)
- Ganancia de los PMTs
- Fluctuaciones estadísticas de la luz de la Luna (Moon DC)



- $\rho$  corregido por delay
- DCs normalizados y corregidos de la Luna

• Contraste de la señal:

$$c(d) = K \frac{\rho}{\sqrt{\frac{DC_1}{G_1} \frac{DC_2}{G_2}}}$$

Una vez que obtenemos este factor de calibración podemos calcular la visibilidad para cada estrella candidata y ajustar el resultado a un cierto diámetro

- Baseline  $d$
- Longitud de onda  $\lambda = 430\text{nm}$
- Diámetro de estrella calibradora



- Visibilidad:

$$|V_{12}(d)| = 2 \frac{B_1(\pi \cdot d \cdot \theta \cdot \lambda)}{\pi \cdot d \cdot \theta \cdot \lambda}$$



$$\frac{c(d)}{c(0)} = |V_{12}(d)|^2$$



$$\leftarrow \frac{c(0)}{K}$$

# Campaña de 2019

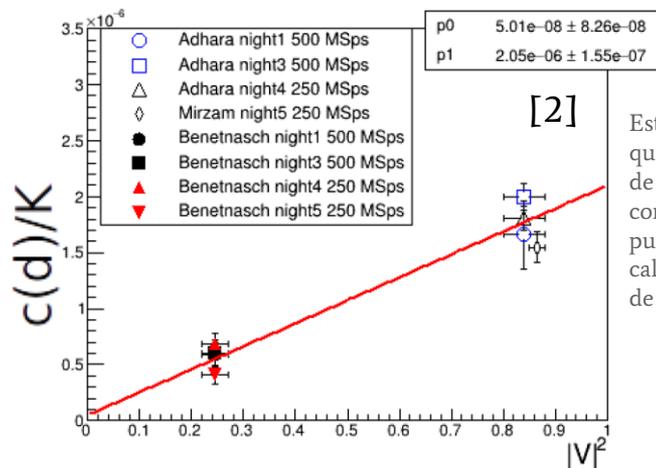
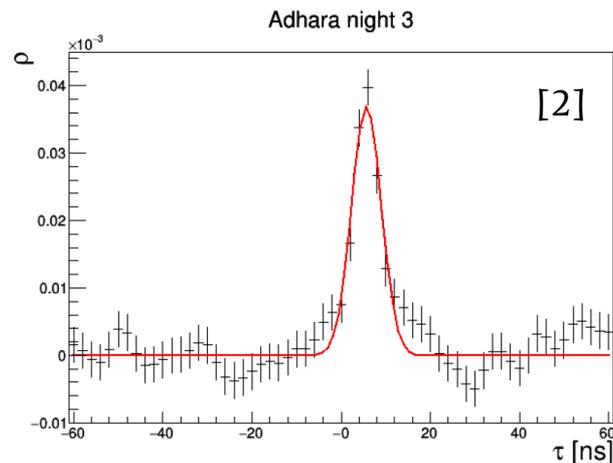
La significancia de las señales de correlación observadas fueron similares a las esperadas.

Se observaron tres estrellas en 5 noches 2019/04/15-19:

- Una calibradora: (Adhara)
- Dos candidatas: (Benetnasch) & (Mirzam)

| Estrella   | Noche | MSps | Runs | Tiempo obs.[sec] | Sigma      |
|------------|-------|------|------|------------------|------------|
| Adhara     | 1     | 500  | 100  | 200              | 5.3        |
| Adhara     | 2     | 500  |      |                  | Mal tiempo |
| Adhara     | 3     | 500  | 300  | 600              | 15.4       |
| Adhara     | 4     | 250  | 260  | 1040             | 12.6       |
| Benetnasch | 1     | 500  | 201  | 402              | 5.8        |
| Benetnasch | 2     | 500  |      |                  | Mal tiempo |
| Benetnasch | 3     | 500  | 175  | 350              | 4.9        |
| Benetnasch | 4     | 250  | 190  | 760              | 7.3        |
| Benetnasch | 5     | 250  | 220  | 880              | 5.1        |
| Mirzam     | 5     | 250  | 268  | 1072             | 9.3        |

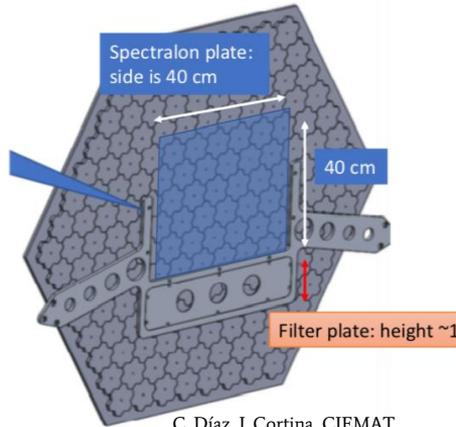
Señal de correlación



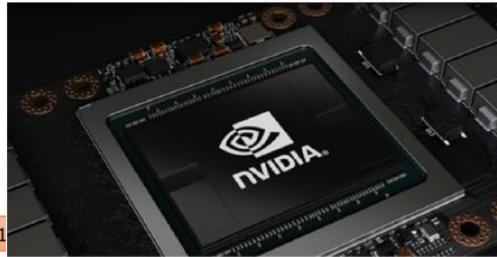
Este plot muestra que las observaciones de las 3 estrellas son consistentes y se pueden usar para calibrar las medidas de visibilidad

# Mejoras de hardware

- Instalación de una montura para filtros controlada de forma remota
- Introducción de procesamiento de datos en tiempo real usando nueva GPU
- Eliminación de deadtime gracias a una nueva tarjeta digitalizadora
- Instalación de un segundo filtro delante de otro pixel para medir simultáneamente el DC de la Luna



C. Díaz, J. Cortina, CIEMAT



GPU NVIDIA TESLA VT100

- Spectrum M4i.4450-x8
- 2 input channels
- 250MHz bandwidth, 500MS/sec
- 14 bit vertical resolution
- >3.4 GB/s streaming



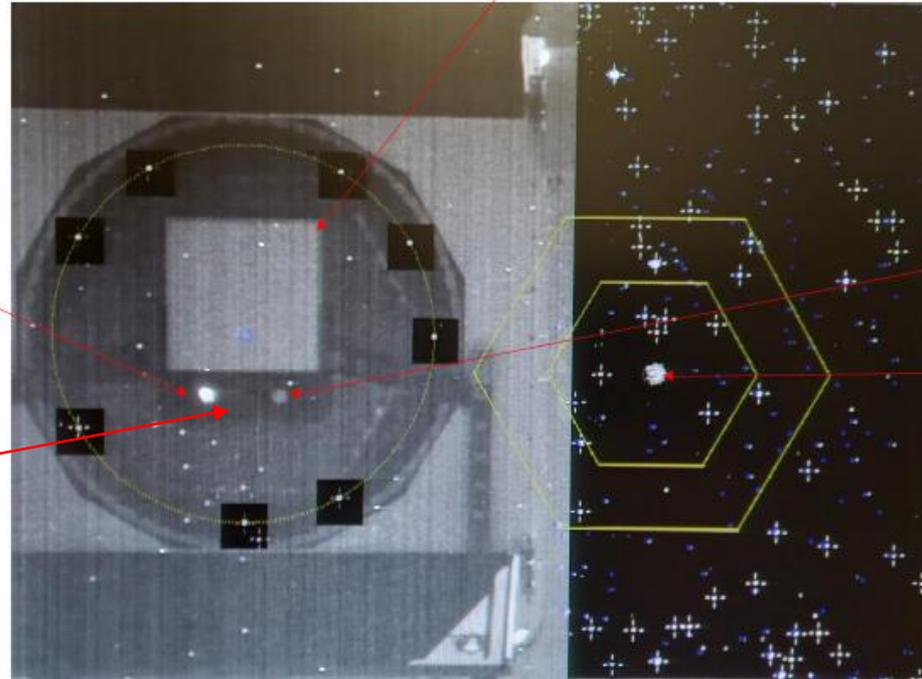
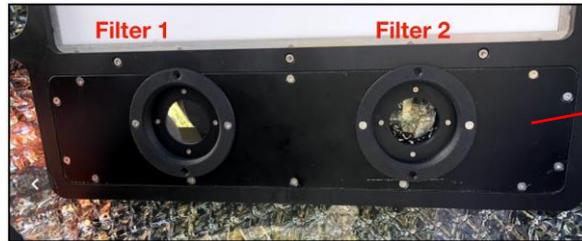
# Medida del DC de la Luna de forma simultánea

Spectralon

Pixel 251  
para toma de datos

Pixel 260  
para medir el DC  
de la Luna de forma  
simultánea

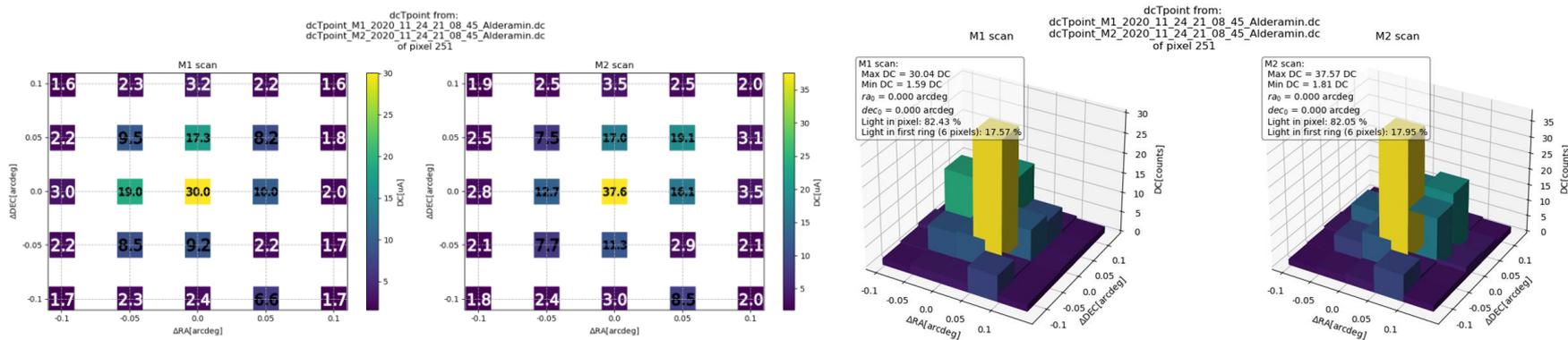
Estrella



# Determinación de parámetros AMC: dcTplotter.py

Ya que no estamos enfocando la luz a la distancia típica de las cascadas atmosféricas (10km) sino al infinito, necesitamos encontrar la configuración correcta de parámetros del AMC (Active Mirror Control) para que la luz de la estrella esté lo más contenida posible en el pixel 251.

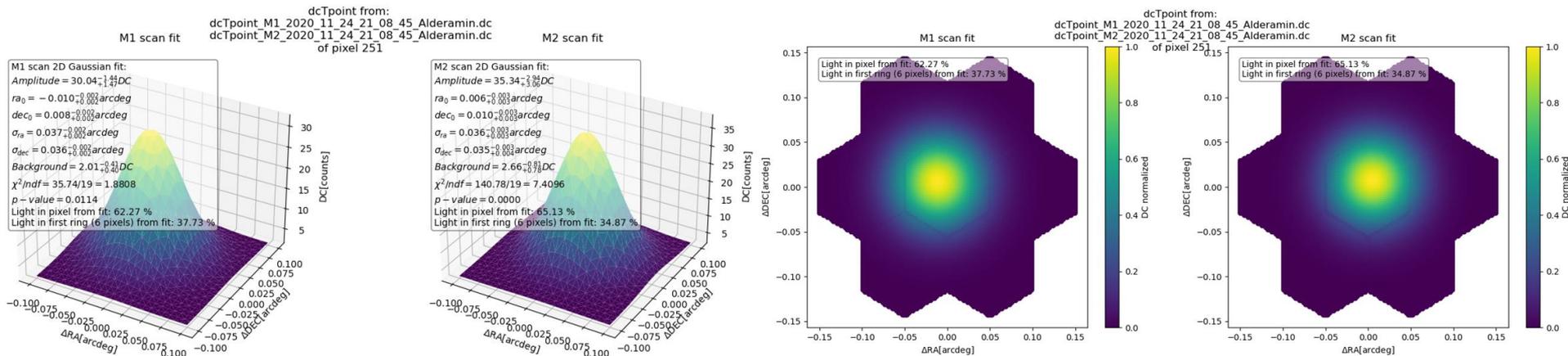
Para ello hacemos barridos de 5x5 en RA y DEC centrados en la posición de una estrella, midiendo el valor del DC del pixel 251 en cada posición.



# Determinación de parámetros AMC: dcTplotter.py

Una vez que tenemos esta distribución del DC podemos estudiarla para saber qué porcentaje de luz cae en nuestro pixel y cuánta se cuela en los 6 píxeles adyacentes.

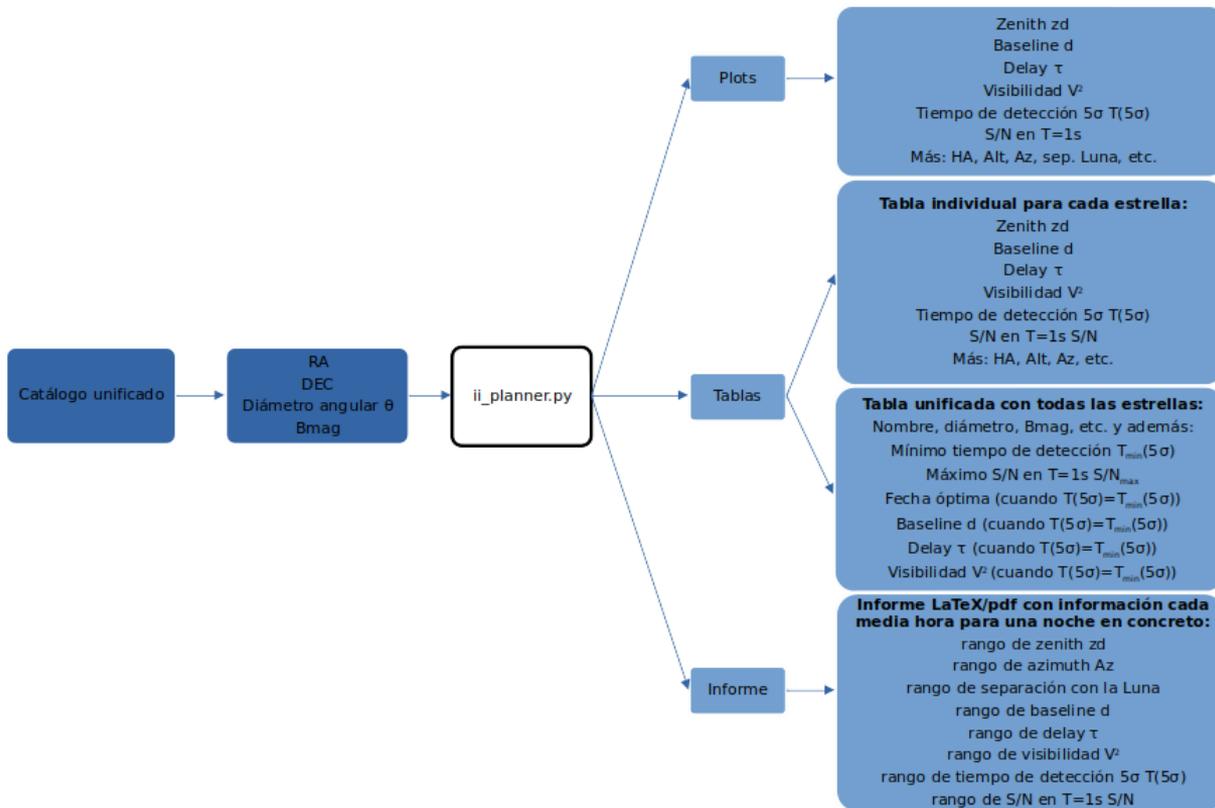
Variando los parámetros y apuntando a varias estrellas al final obtuvimos los más óptimos, que son los que usamos para medir con dicho pixel.



# Creación de un catálogo unificado: ii\_catalog.py

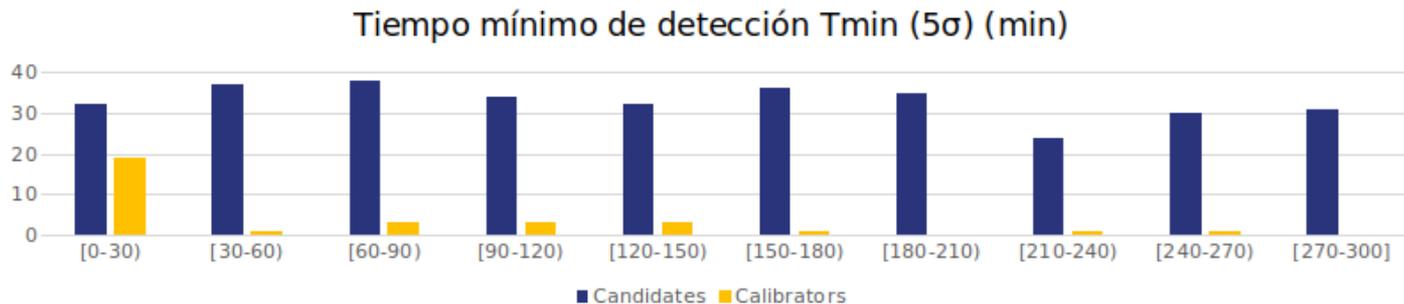
- Catálogos de diámetros angulares estimados -> **Estrellas candidatas**
  - Swihart 1523 estrellas
    - $-15^{\circ} < \delta < 81^{\circ}$
    - $1.34 \text{ mag} < \text{magnitud en B} < 7.54 \text{ mag}$
    - $0.077 < \text{diámetro angular } \theta < 2.48 \text{ mas}$
    - Método: interferometría óptica
  - JSDC (JMMC Stellar Diameters Catalogue) 465877 estrellas
    - $-90^{\circ} < \delta < 90^{\circ}$
    - $-1.431 \text{ mag} < \text{magnitud en B} < 19.76 \text{ mag}$
    - $0.001815 < \text{diámetro angular } \theta < 41.398712 \text{ mas}$
    - Método: diámetros angulares estimados por medio de software
- Catálogos de diámetros angulares medidos -> **Estrellas calibradoras**
  - JMDC (JMMC Measured Stellar Diameters Catalogue) 1478 estrellas
    - $-80^{\circ} < \delta < 90^{\circ}$
    - $-1.46 \text{ mag} < \text{magnitud en B} < 16.55 \text{ mag}$
    - $0.05 < \text{diámetro angular } \theta < 420 \text{ mas}$
    - Métodos: interferometría óptica, ocultación lunar e interferometría de intensidad

# Uso del catálogo unificado para hacer scheduler: ii\_planner.py



# Uso del catálogo unificado para hacer scheduler: ii\_planner.py

En total 361 estrellas: 329 candidatas y 32 calibradoras

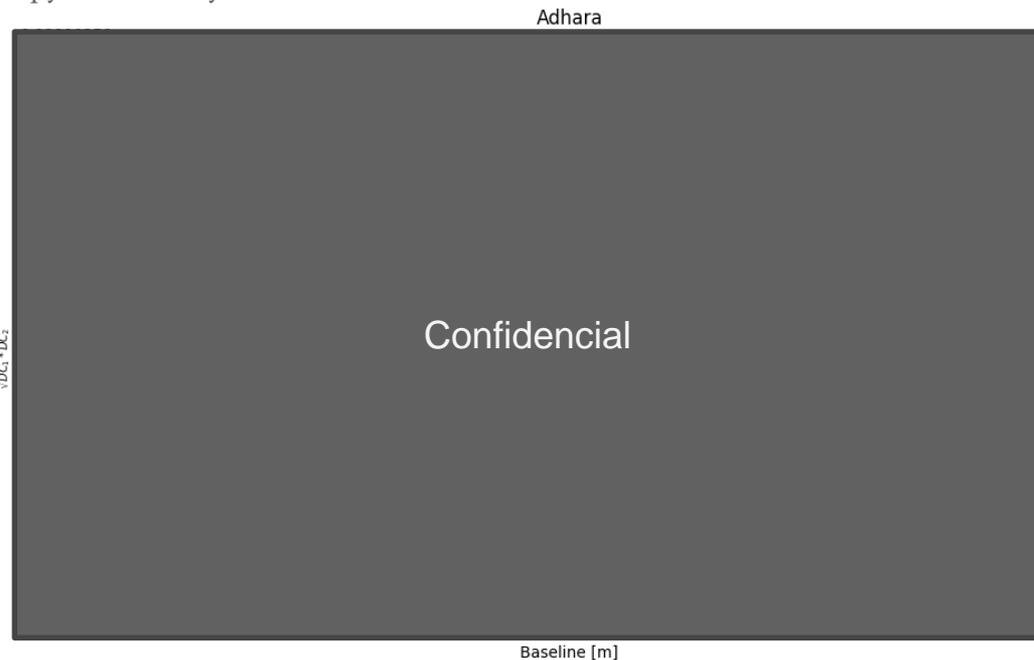


# Campaña de 2021

15 estrellas observadas en 7 noches durante los 'Moon breaks' de enero, febrero y marzo

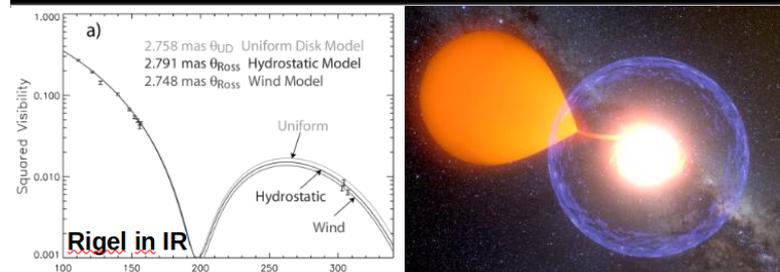
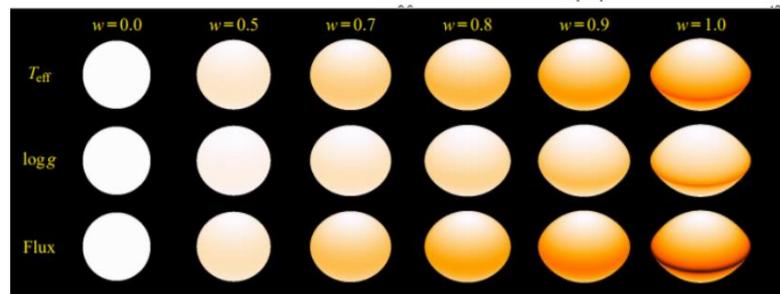
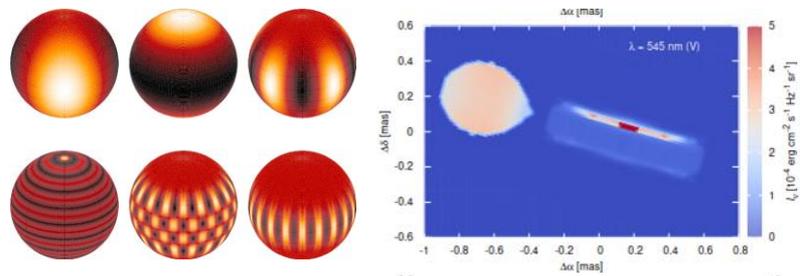
| Estrella     | Bmag | Tiempo obs. [min] | Tipo espectral | $\theta$ estimado [mas] (literatura) | $\theta$ medido [mas] (literatura) |
|--------------|------|-------------------|----------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Calibradoras |      |                   |                |                                      |                                    |
| Confidencial |      |                   |                |                                      |                                    |
| Candidatas   |      |                   |                |                                      |                                    |
| Confidencial |      |                   |                |                                      |                                    |

22,6 horas de datos están siendo analizadas actualmente con la librería de python ii\_analysis



# Aplicaciones de la técnica de interferometría de intensidad

- Construir catálogos de diámetros angulares de estrellas
- Determinar propiedades fundamentales de las estrellas como su radio físico y su temperatura efectiva
- Comprobar ciertos supuestos inherentes a modelos de estructura y evolución estelar
- Constreñir modelos de asteroseismología
- Estudiar el oscurecimiento del limbo en estrellas de gran diámetro angular (Vega, Rigel)
- Estudiar cómo cambia la medida del diámetro angular para rotadores rápidos
- Estudiar otros objetos (novas, supernovas, discos circunestelares...)
- Y más que aún no conocemos...



# Conclusiones y futuro

Durante estos últimos años se ha **demostrado** que es posible utilizar la técnica de interferometría de intensidad con los telescopios MAGIC, hazaña en la que el CIEMAT ha tenido un papel fundamental.

No solo eso, sino que la sensibilidad obtenida es competitiva con otros experimentos, y su Active Mirror Control lo convierte en un experimento extremadamente versátil:

- Permite modificar los telescopios MAGIC para estudiar un rango de baselines más amplio (creando sub-telescopios virtuales).
- Esto permitirá medir de forma directa y simultánea el ZBC (zero baseline correlation), lo cual mejorará de forma significativa nuestra sensibilidad.

También se ha planteado hacer uso del vecino de MAGIC: el telescopio LST1 (Large Size Telescope) de CTA (Cherenkov Telescope Array), mejorando tanto la sensibilidad como el rango de baselines.

El trabajo que se está realizando ahora en MAGIC servirá para sentar las bases para usar CTA como interferómetro de intensidad en el futuro.

# Presentaciones en congresos, publicaciones, estancias y referencias

## Presentaciones en congresos/publicaciones:

- Jiménez, I., and MAGIC Collaboration. "High angular resolution at optical wavelengths using the Intensity interferometry technique in the MAGIC telescopes." *Contributions to the XIV. 0 Scientific Meeting (virtual) of the Spanish Astronomical Society*. 2020.
- Jiménez, I., for the Intensity Interferometry group. "Intensity Interferometry Science: Building the calibrators and candidates catalog". Contribución al meeting de colaboración de MAGIC. 2020.
- Acciari, V. A., Bernardos, M. I., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Delgado, C., ... & Zampieri, L. (2020, December). Intensity interferometry with MAGIC. In *Optical and Infrared Interferometry and Imaging VII* (Vol. 11446, p. 114461C). International Society for Optics and Photonics.
- Abdalla, H., Abe, H., Acero, F., Acharyya, A., Adam, R., Agudo, I., ... & Font, L. (2021). Sensitivity of the Cherenkov Telescope Array for probing cosmology and fundamental physics with gamma-ray propagation. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2021(02), 048.

## Estancias:

- Estancia en La Palma de un mes para shift en CTA-LST1 (septiembre 2020)
- Estancia en La Palma de un mes para shift en MAGIC (enero 2021)

## Referencias:

- [1] Foto de MAGIC con el cometa Neowise <https://apod.nasa.gov/apod/ap200724.html>
- [2] Acciari, V. A., Bernardos, M. I., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., De Angelis, A., ... & Will, M. (2020). Optical intensity interferometry observations using the MAGIC imaging atmospheric Cherenkov telescopes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(2), 1540-1547.

**¡Gracias por vuestra atención!**

# Backup

# Términos para calcular la señal ruido

$$S/N = A \cdot \alpha(\lambda_0) \cdot g(\lambda_0) \cdot n(\lambda_0) \cdot |V|^2(\lambda_0, d) \cdot \sqrt{b_v} \cdot F^{-1} \cdot \sqrt{T/2} \cdot \sigma$$

*A = mirror area*

*$\lambda_0$  = central wavelength*

*$\alpha(\lambda_0)$  = quantum efficiency (QE) of the PMTs*

*$g(\lambda_0)$  = QE of the rest of the optics*

*$n(\lambda_0)$  = star's differential photon flux*

*$b_v$  = effective cross – correlation electrical bandwidth*

*F = excess noise factor of the PMT*

*T = observation time*

*$\sigma$  = normalized spectral distribution of the light after the filter*

# Ejemplos de plots de ii\_planner.py

