

Los aceleradores cósmicos vistos por el observatorio de rayos gamma HAWC

Alberto Carramiñana

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
Luis Enrique Erro 1, Tonantzintla, Puebla, México

1. Presentación
2. El observatorio HAWC
3. Aceleradores Galácticos
4. Aceleradores extragalácticos

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

- El Observatorio Astrofísico Nacional (OAN-Ton) fue fundado por Luis Enrique Erro en Tonantzintla, Puebla en febrero 1942.
 - Guillermo Haro descubrió los objetos HH con la Cámara Schmidt de Tonantzintla en los 1950s.
- El OAN-Ton fue transformado en INAOE por Guillermo Haro en noviembre de 1971.
- El INAOE nace con el proyecto de establecer el observatorio de Cananea - hoy Observatorio Astrofísico Guillermo Haro, operacional desde 1988.



El Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano

- Colaboración de largo plazo entre el INAOE y la UMASS, Amherst, con el objetivo de construir, operar y explotar el mayor telescopio milimétrico del mundo - aprobado de forma binacional en noviembre 1994.
- El GTM es una antena de 50m de diámetro para observaciones astronómicas en la banda de 0.8-4.0 mm, instalado en la cima del Volcán Sierra Negra, a 4593m.
- Operacional desde 2013 (32m → 50m).
- La mayor antena del Event Horizon Telescope.

Su desarrollo abrió el camino a HAWC



¡Ahora HAWC!

- HAWC por High Altitude Water Cherenkov (GRO).
- HAWC es una colaboración internacional.
- HAWC es un arreglo de detectores de superficie (Extended Air Shower Array) a gran altura, ubicado en el Volcán Sierra Negra, Puebla (19°N; 4100m).
- HAWC es un detector de rayos γ de gran campo de visión operando de forma continua el cielo que transita sobre su cenit:
 - rango de energía $\sim 0.1 - 100$ TeV : óptimo ~ 7 TeV.
 - campo de visión ~ 1.8 sr (15% del cielo)
→ patrullaje ~ 8.4 sr / día sideral (2/3 del cielo).



La colaboración HAWC



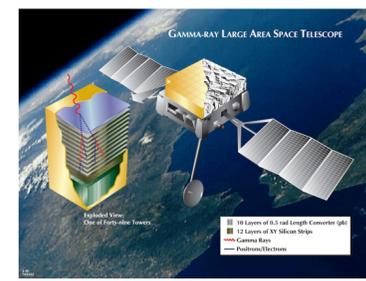
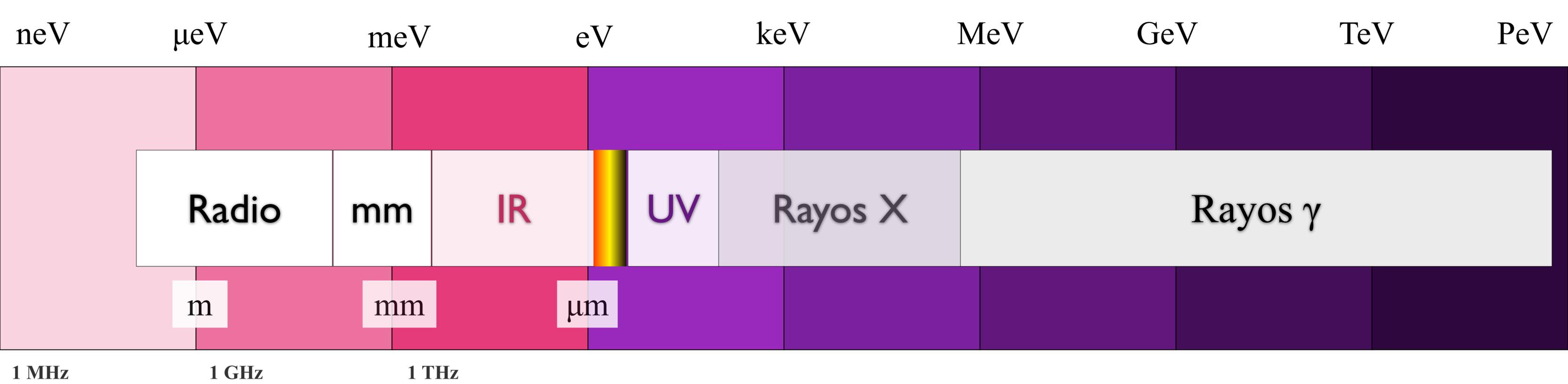
Formada en julio de 2007 por México y Estados Unidos.
Actualmente con participación de Europa, América Latina y Asia



La Colaboración



<u>México</u>	<u>Estados Unidos</u>	<u>Europa</u>	
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica	University of Maryland	Max Planck Institute für Kernphysik, Heidelberg	Alemania
Universidad Nacional Autónoma de México	Los Alamos National Laboratory	F. Alexander Universität, Erlangen	Alemania
Instituto de Astronomía UNAM	George Mason University	Institute of Nuclear Physics, Cracovia	Polonia
Instituto de Ciencias Nucleares UNAM	Georgia Institute of Technology	INFN & Universita di Padova	Italia
Instituto de Física UNAM	Michigan State University	IFIC - Universidad de Valencia	España
Instituto de Geofísica UNAM	Michigan Technological University		
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla	Pennsylvania State University	<u>Asia</u>	
Centro de Investigación y Estudios Avanzados	NASA GSFC	University of Seoul	Corea del Sur
Instituto Politécnico Nacional	Stanford University	Shanghai Jiao Tong University	China
Centro de Investigación en Computo	University of California Santa Cruz	Chulalongkorn University	Tailandia
Instituto de Física	University of California Irvine		
Universidad Autónoma de Chiapas	University of New Hampshire	<u>América Latina</u>	
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo	University of New Mexico	Universidad de Costa Rica	Costa Rica
Universidad de Guadalajara	University of Rochester		
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo	University of Utah		
Universidad Politécnica de Pachuca	University of Wisconsin		



No térmico (e)



Térmico

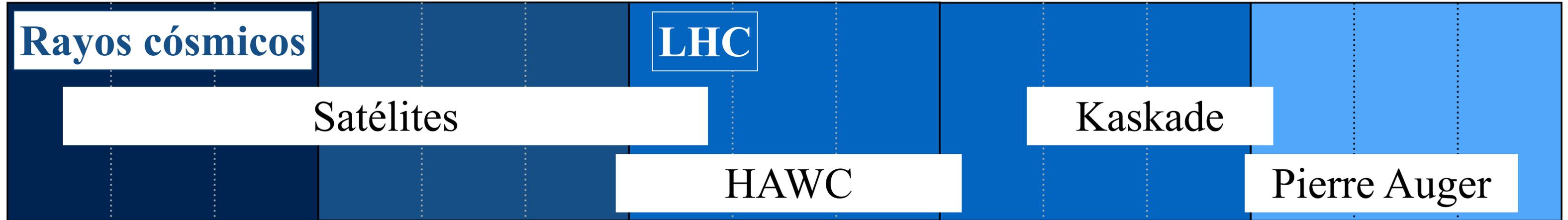


No térmico (RCs)

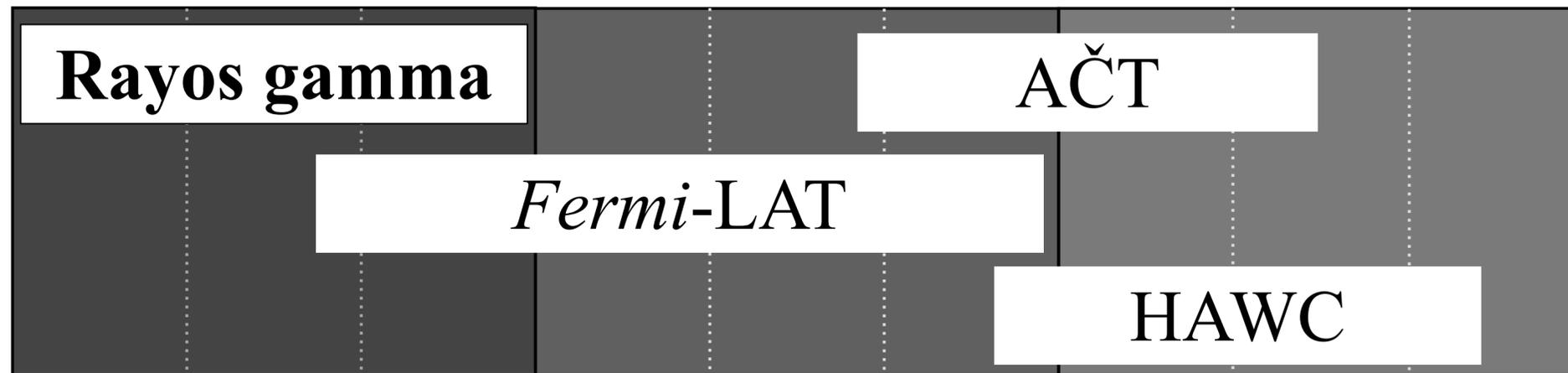


Bandas de altas energías

10^6 eV 10^9 eV 10^{12} eV 10^{15} eV 10^{18} eV 10^{20} eV



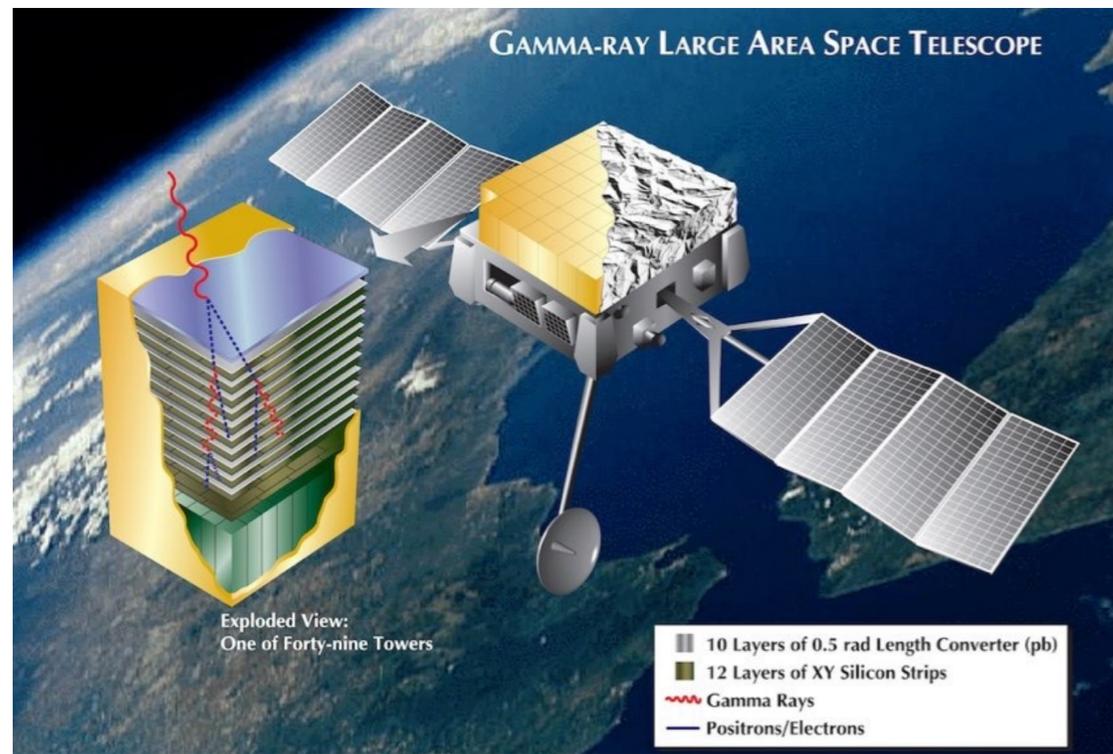
MeV GeV TeV PeV EeV



Neutrinos...

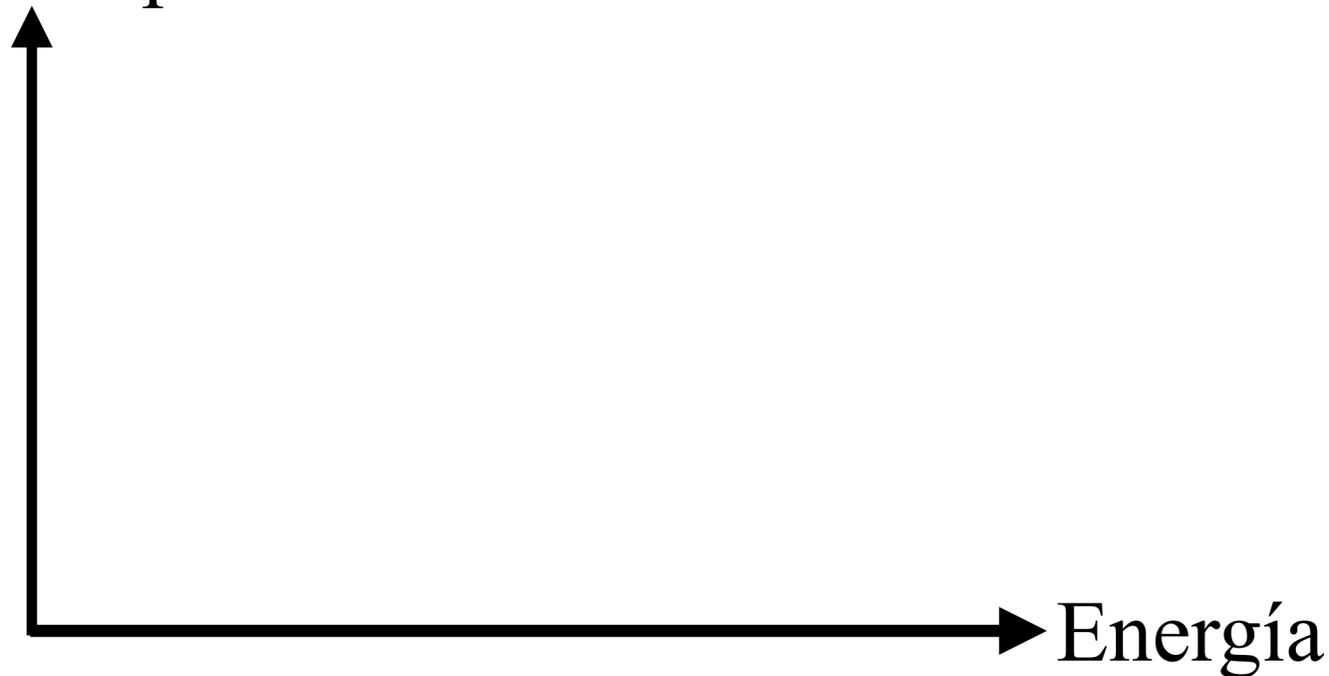
Visible: 1.5 a 4 eV || Rayos X: 1 keV

Estereor-
radianes:
15% -
25% del
cielo

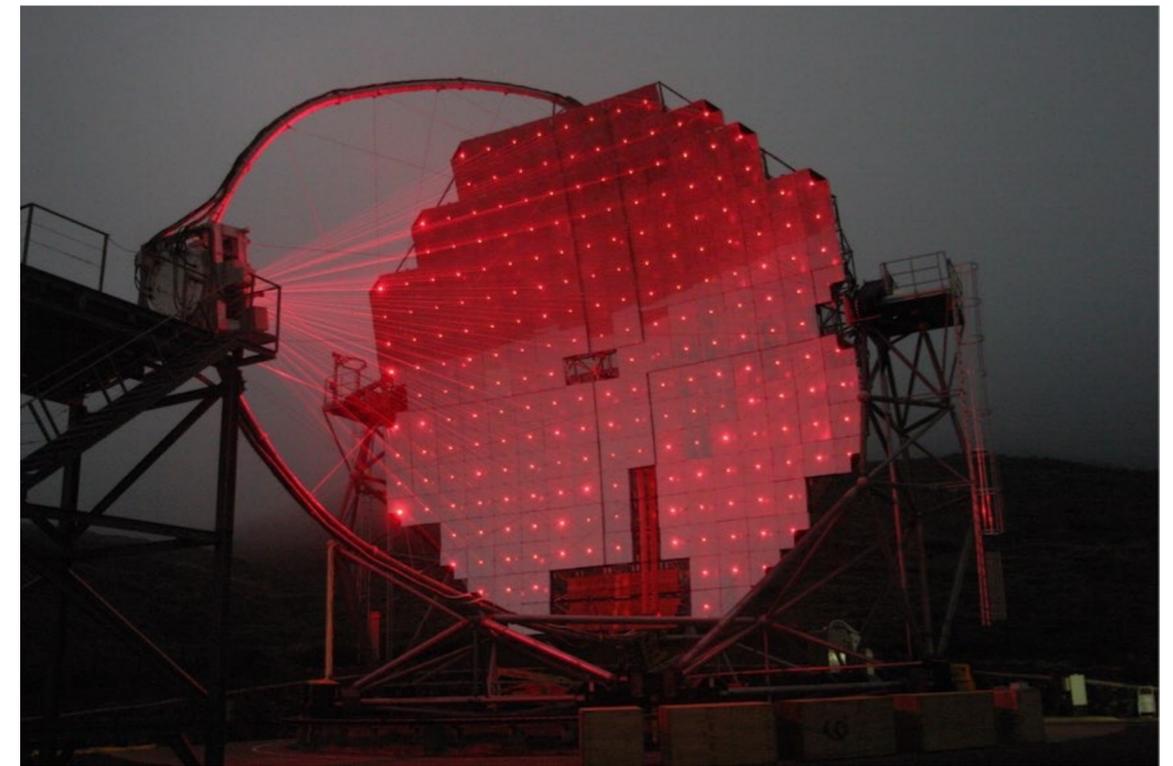


Grados:
hasta 5°, o
10 × Luna

Campo de visión



GeV



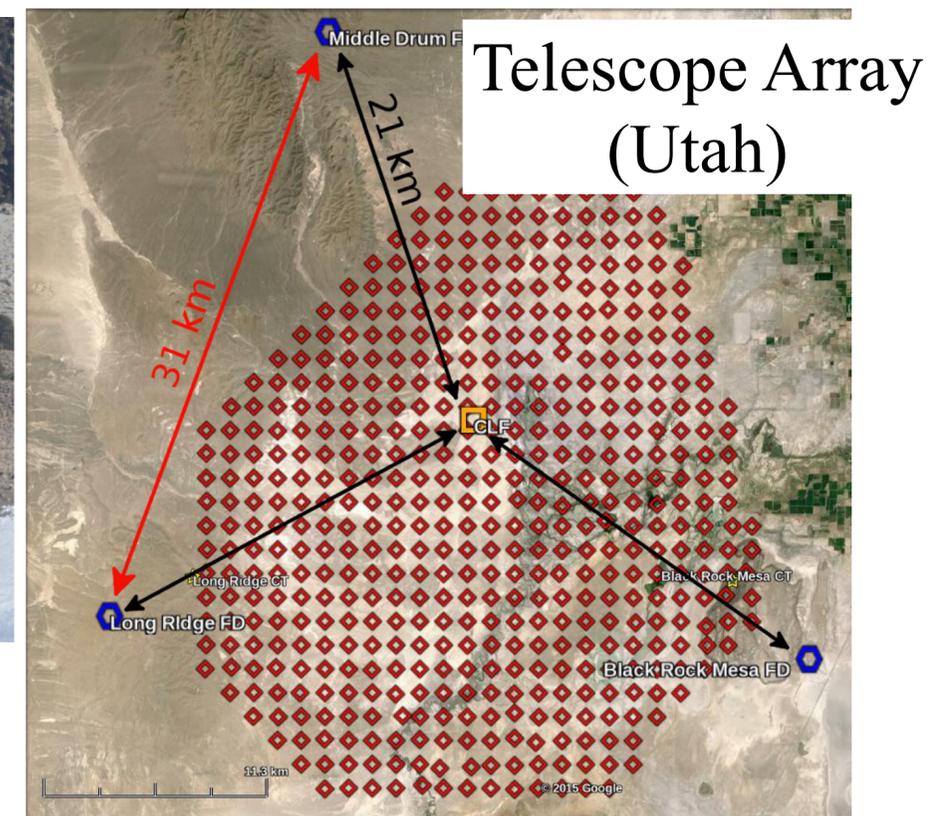
TeV

Detectores de superficie

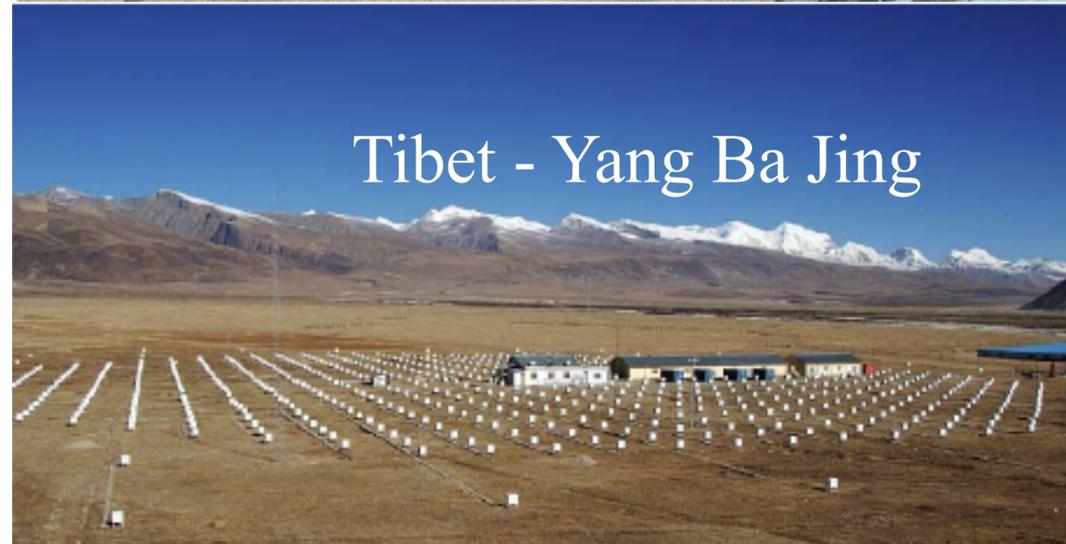
- rayos cósmicos (1950s)
- rayos gamma (2000s)



HAWC



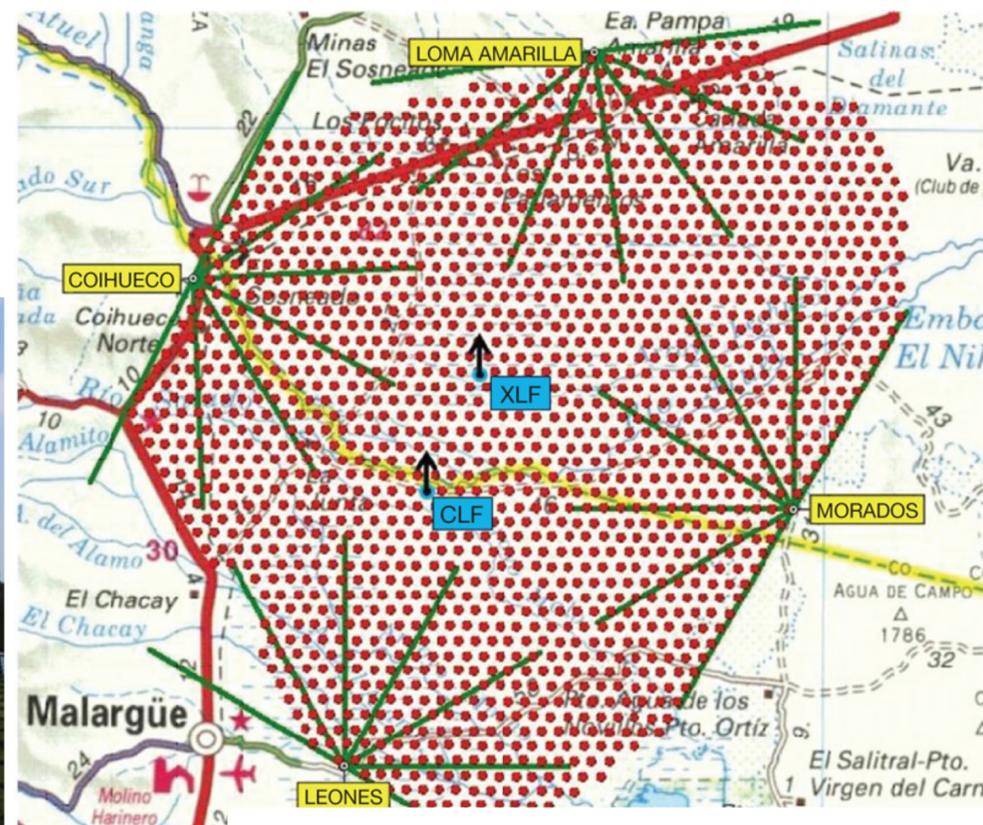
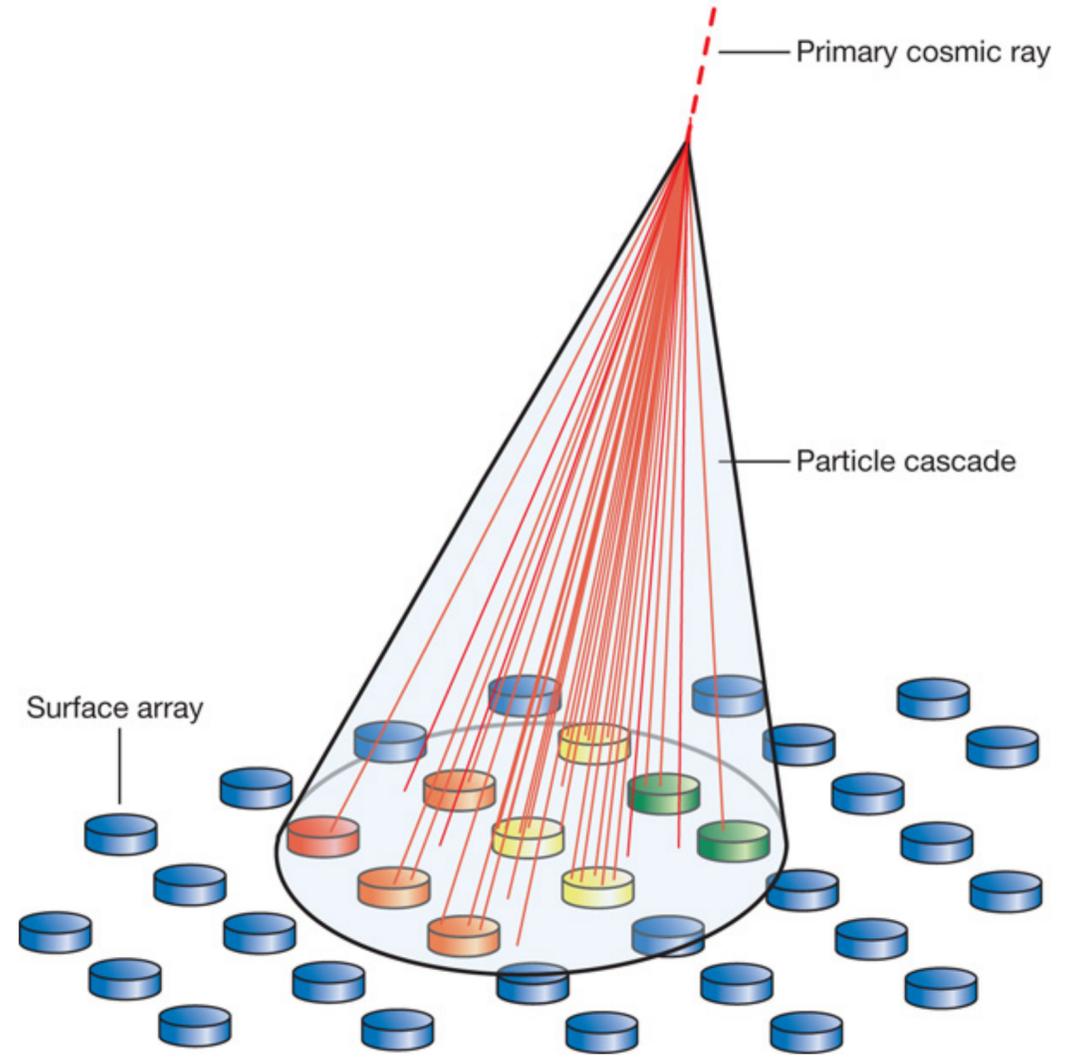
Telescope Array (Utah)



Tibet - Yang Ba Jing

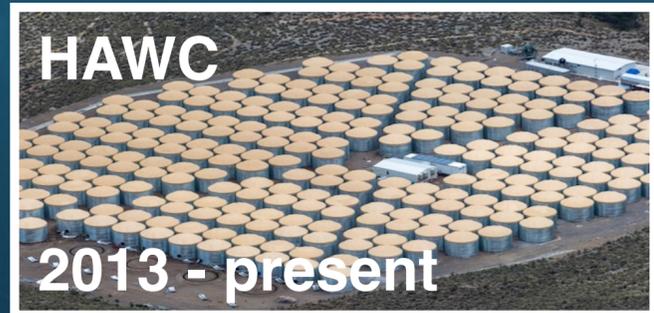


Kaskade



Pierre Auger Observatory

Observatorios de rayos y a gran altura



SWGO
(2024)



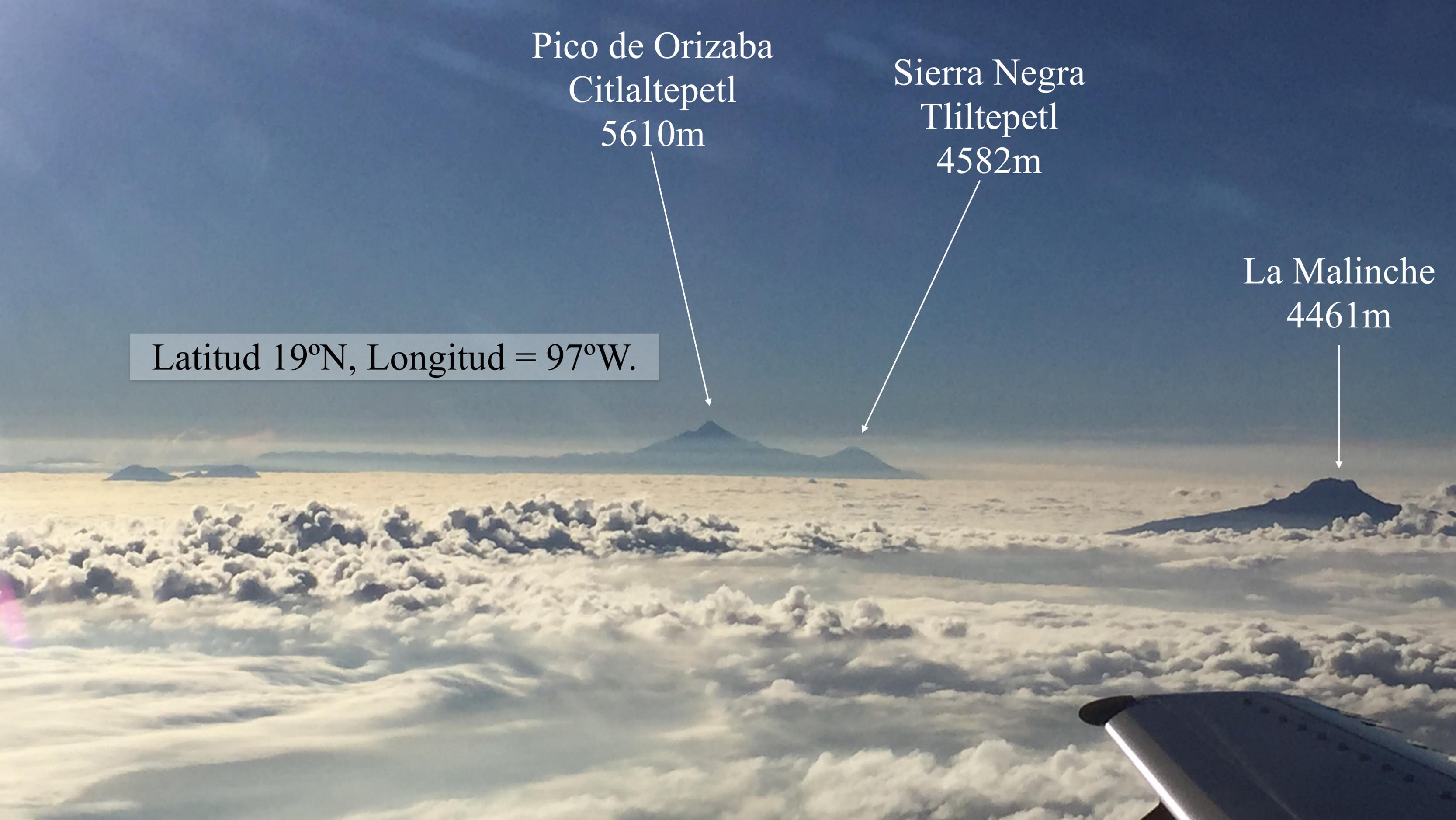
LHAASO
since 2019

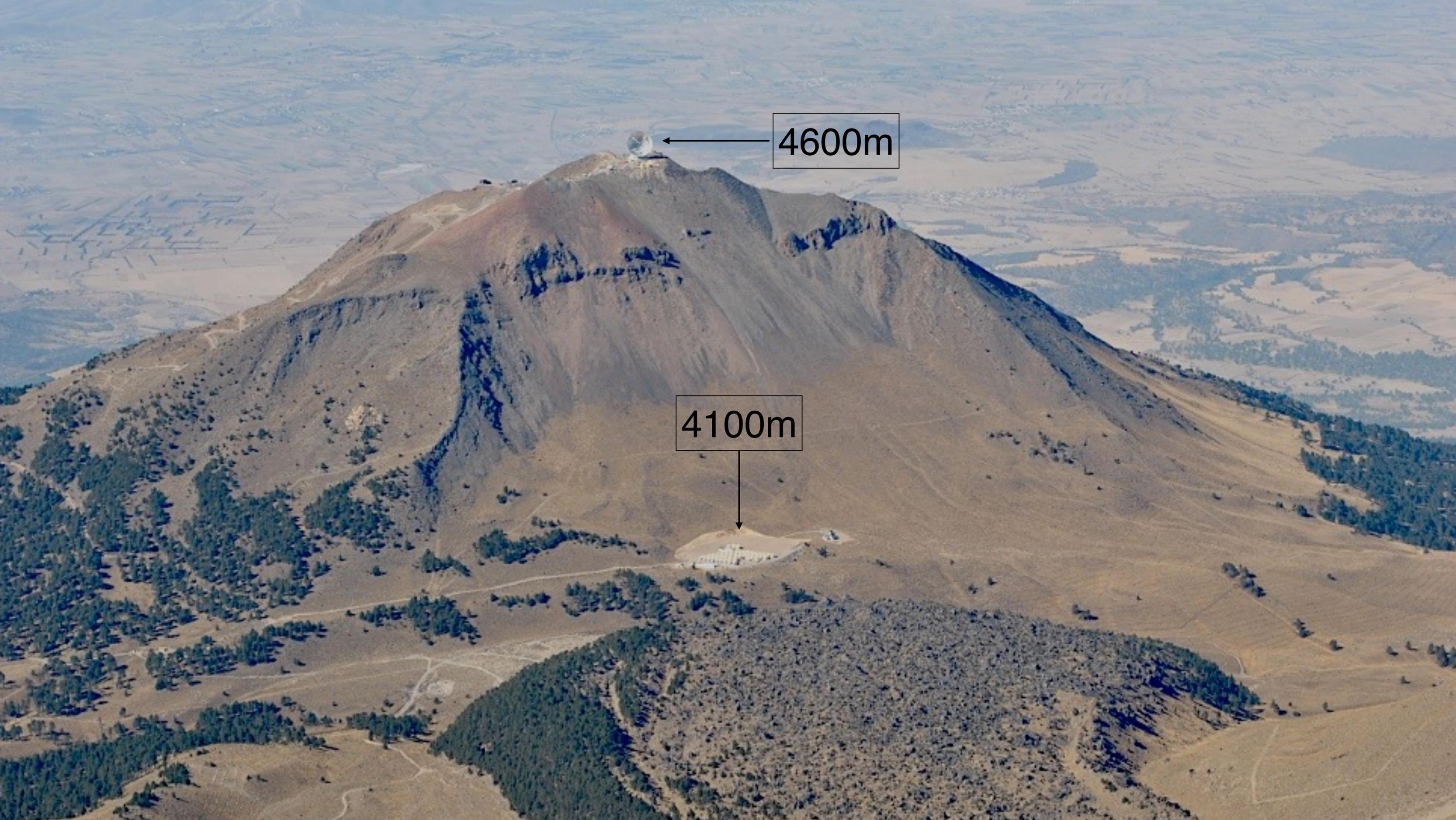
Pico de Orizaba
Citlaltepetl
5610m

Sierra Negra
Tliltepetl
4582m

La Malinche
4461m

Latitud 19°N, Longitud = 97°W.



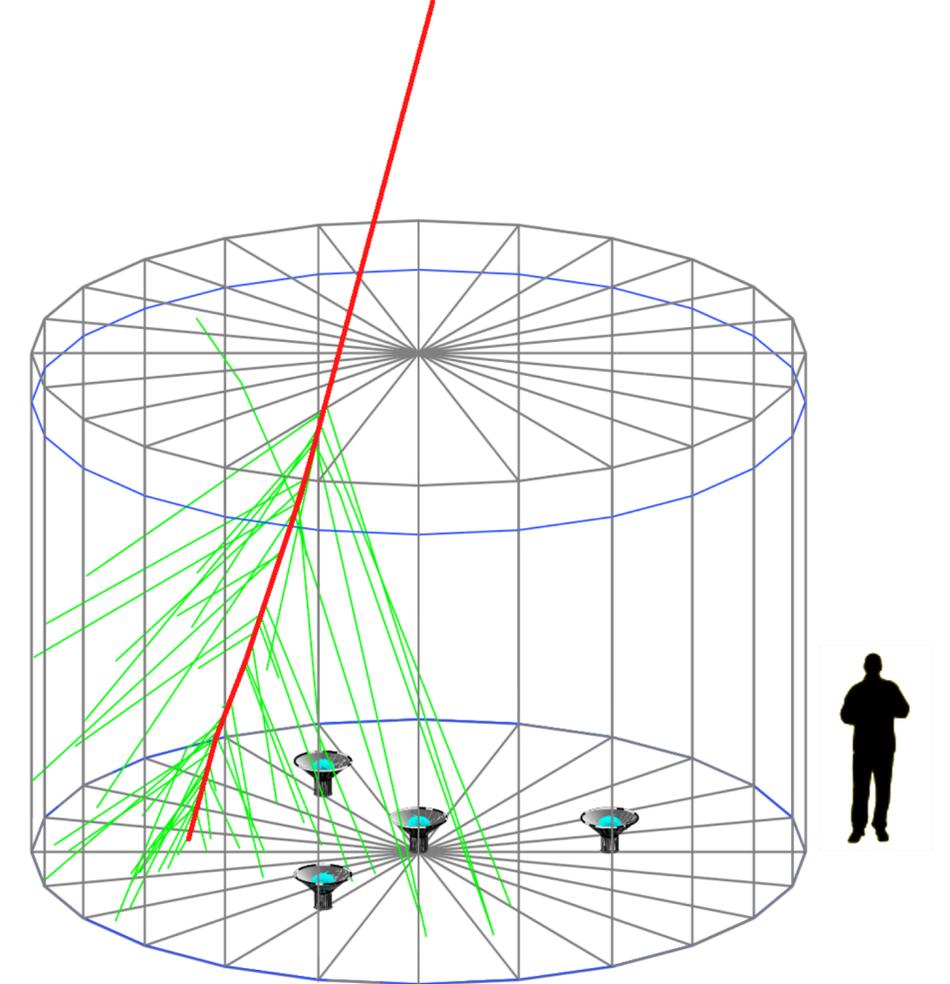


4600m

4100m

El detector HAWC

- HAWC es un arreglo de 300 detectores Cherenkov de agua (WCD).
- Cada WCD contiene 180,000 litros de agua.
- El agua es tratada para maximizar su transparencia.
- Cada WCD tiene 3(8") + 1(10") PMTs: respuesta rápida y buena eficiencia cuántica a la luz Cherenkov (azul a UV).
- Cada WCD está conectado a la caseta central para el control de voltaje ($4 \times$), adquisición de datos y calibración mediante fibra óptica.
- Monitoreo y control constante de 1200 canales.





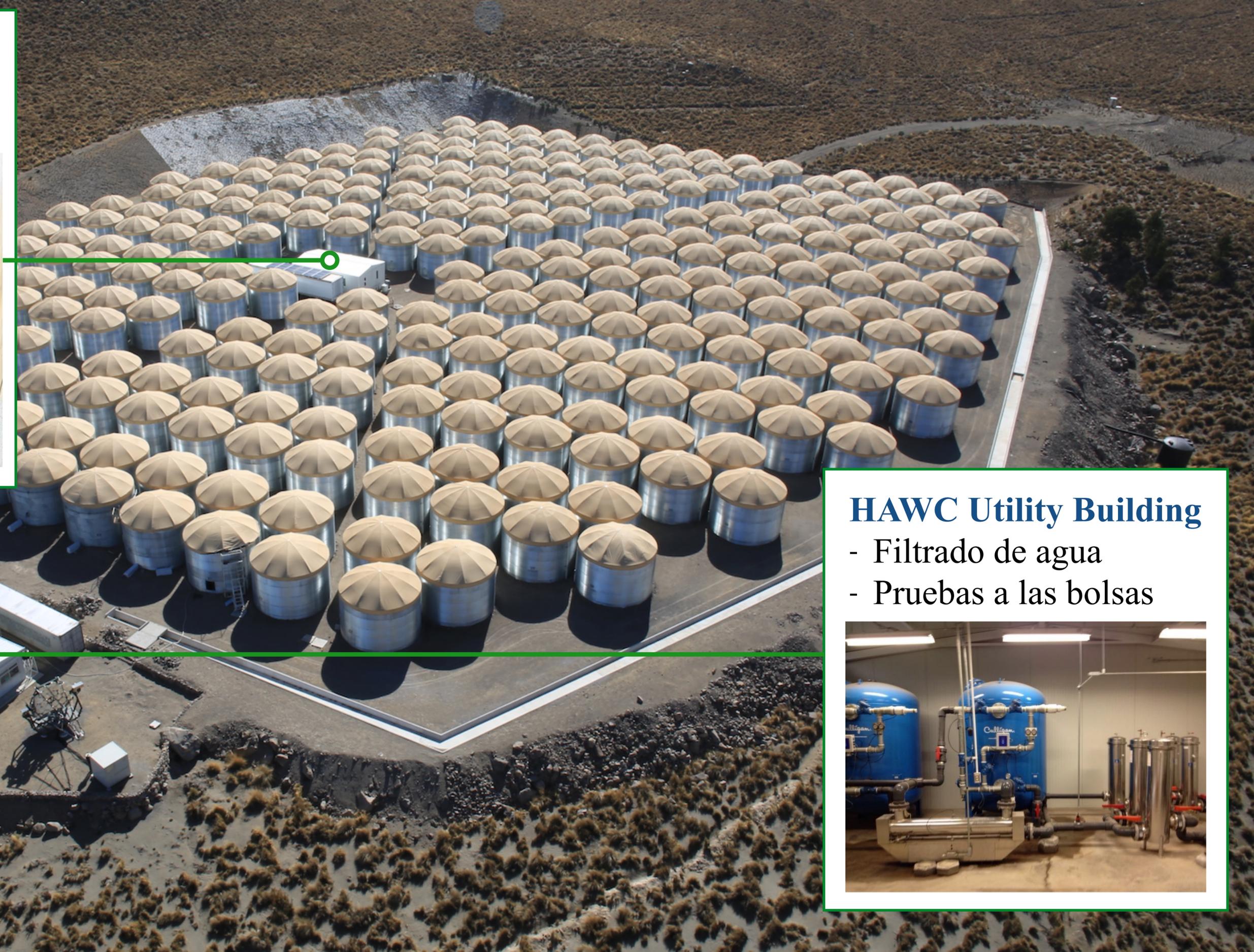


> 22,000 m²



Counting House

- Adquisición de datos & sistema de calibración laser



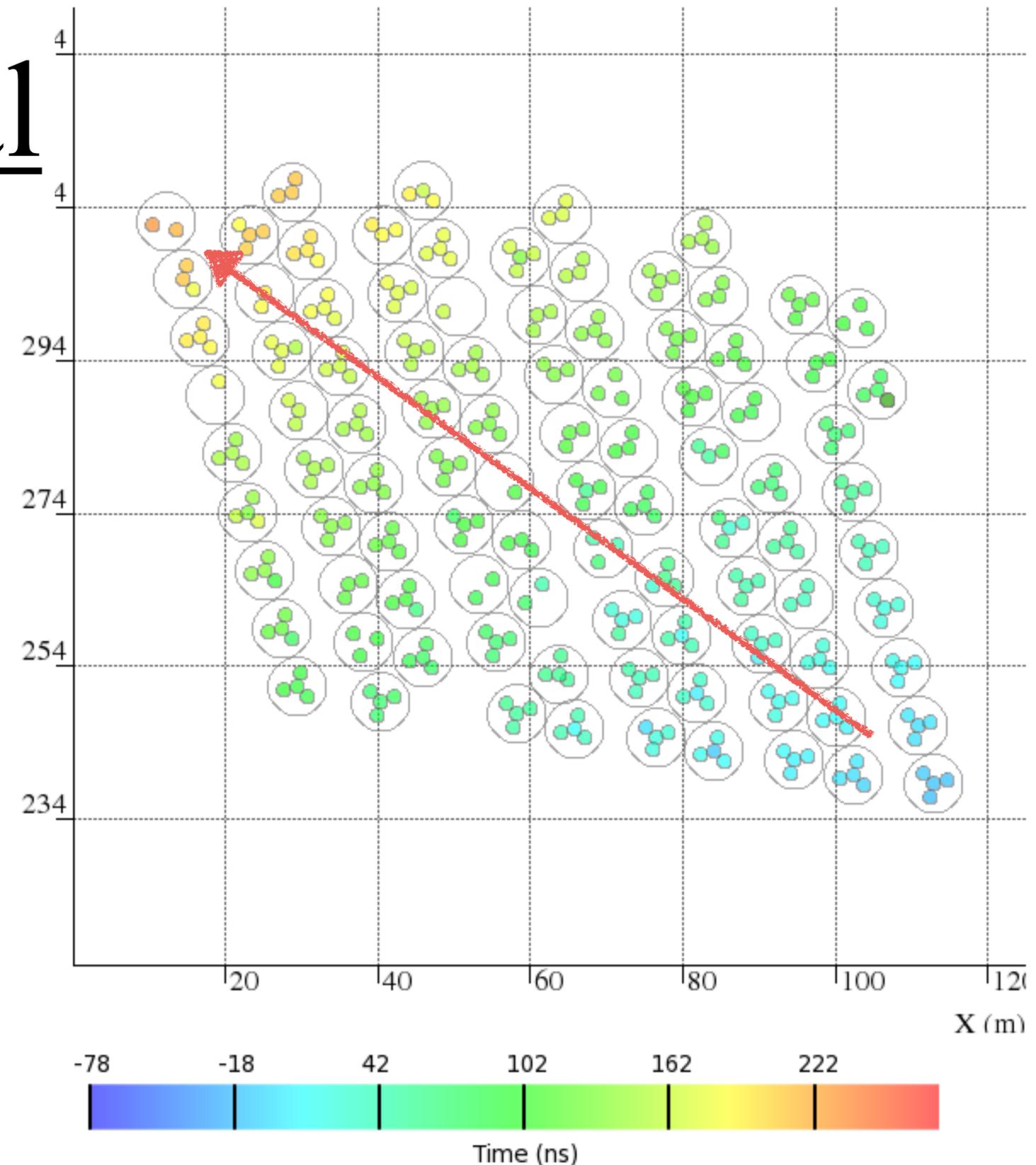
HAWC Utility Building

- Filtrado de agua
- Pruebas a las bolsas



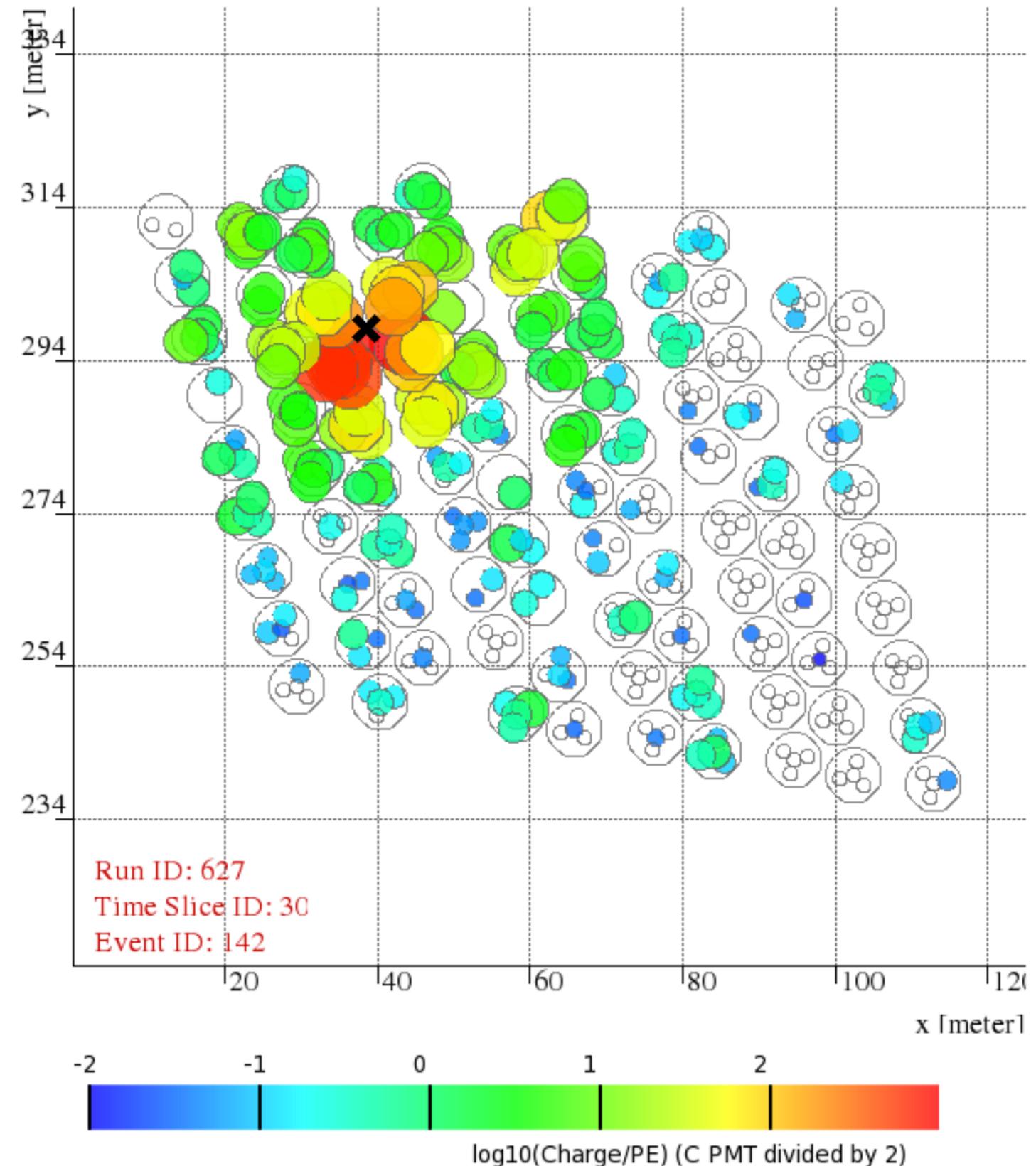
Información temporal

- La información temporal de las señales en los PMT permite estimar la dirección del evento primario en el cielo.
- El espacio entre WCDs equivale a $\sim 25 - 50$ ns luz.
- Los frentes de partículas se ajustan a planos curvados con residuos por debajo de 1 ns.



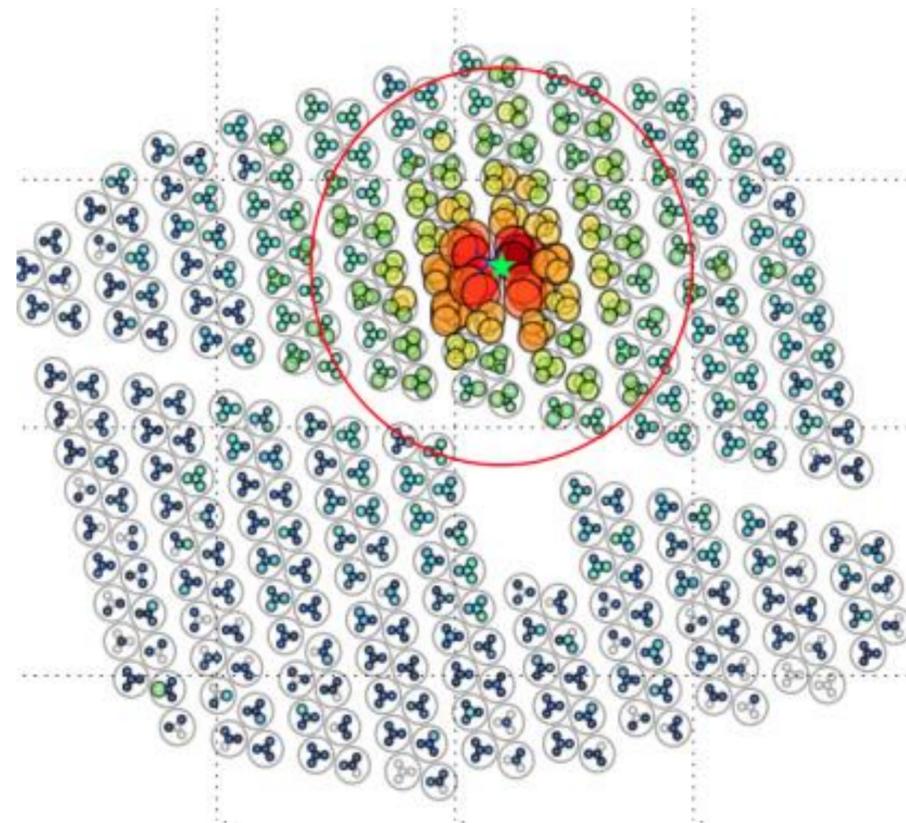
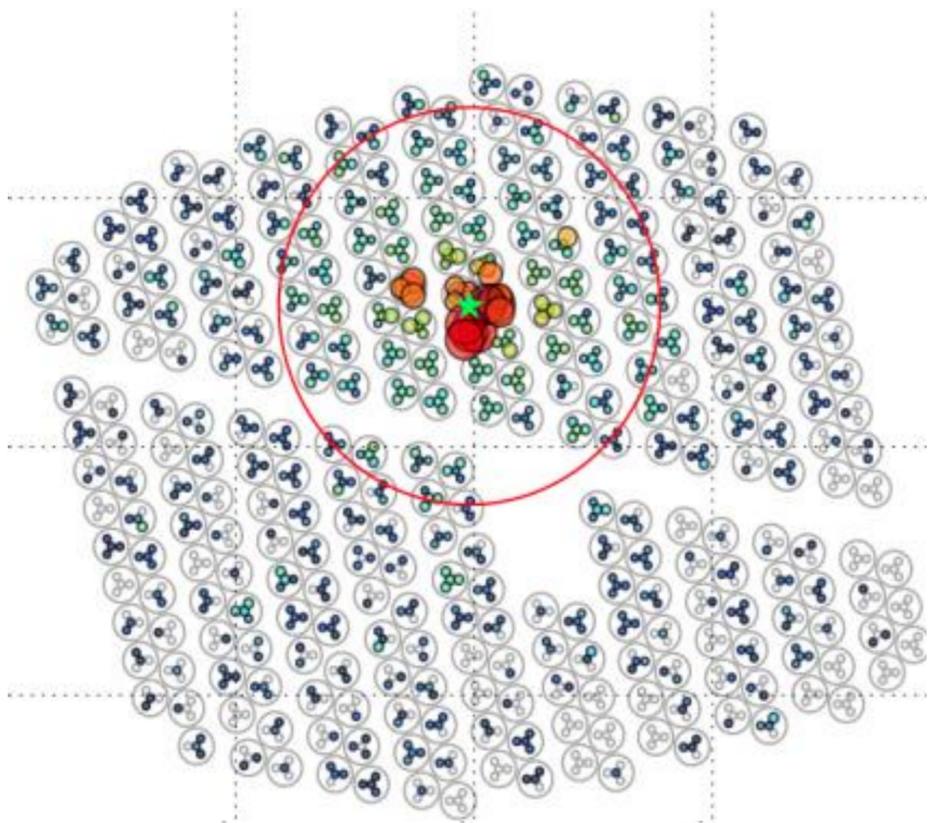
Depósitos de carga

- Los PMTs miden pulsos individuales de luz Cherenkov.
- Se determina el centro de la cascada y se estima la energía del evento primario vía:
 - (1) la fracción de PMTs que registran una señal por encima del ruido, definiendo nueva canales “f-hit”.
 - (2) mediante el ajuste de perfiles estándar de cascadas electromagnéticas de partículas a la distribución radial en la superficie (más preciso que (1)).
- Se requieren modelos y simulaciones de la respuesta de HAWC, incluida la atmósfera.



Discriminación γ / hadrón

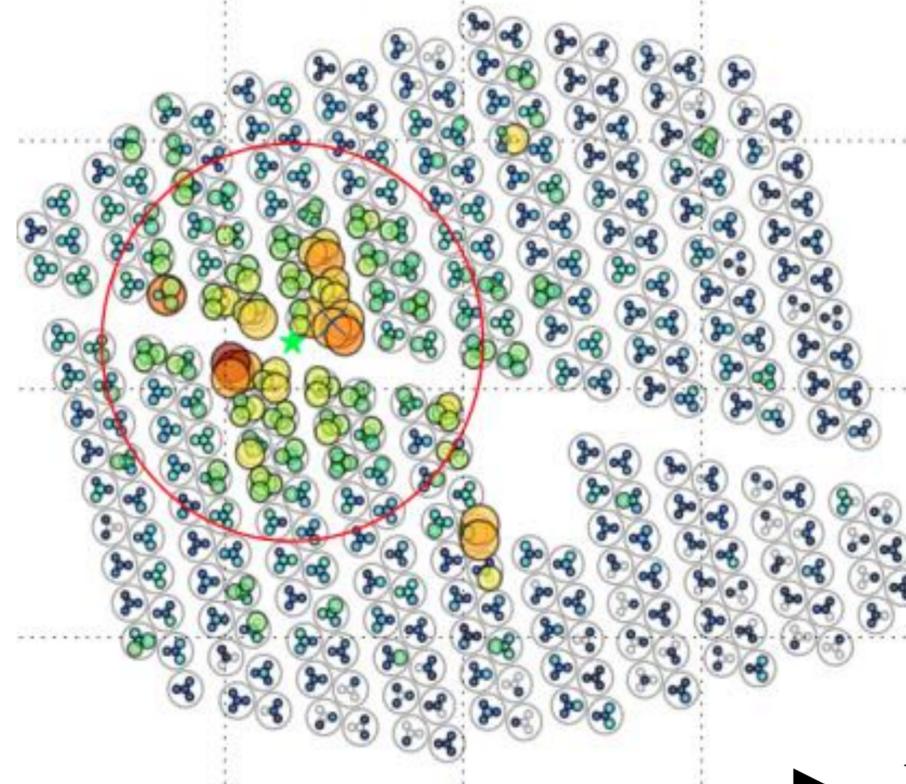
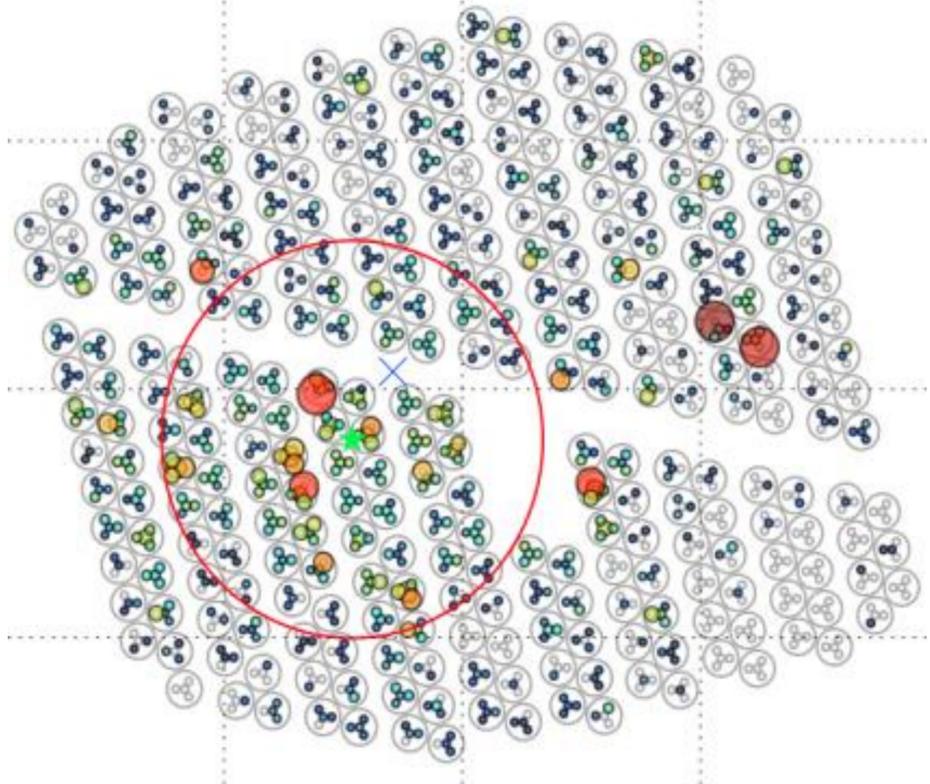
γ -ray

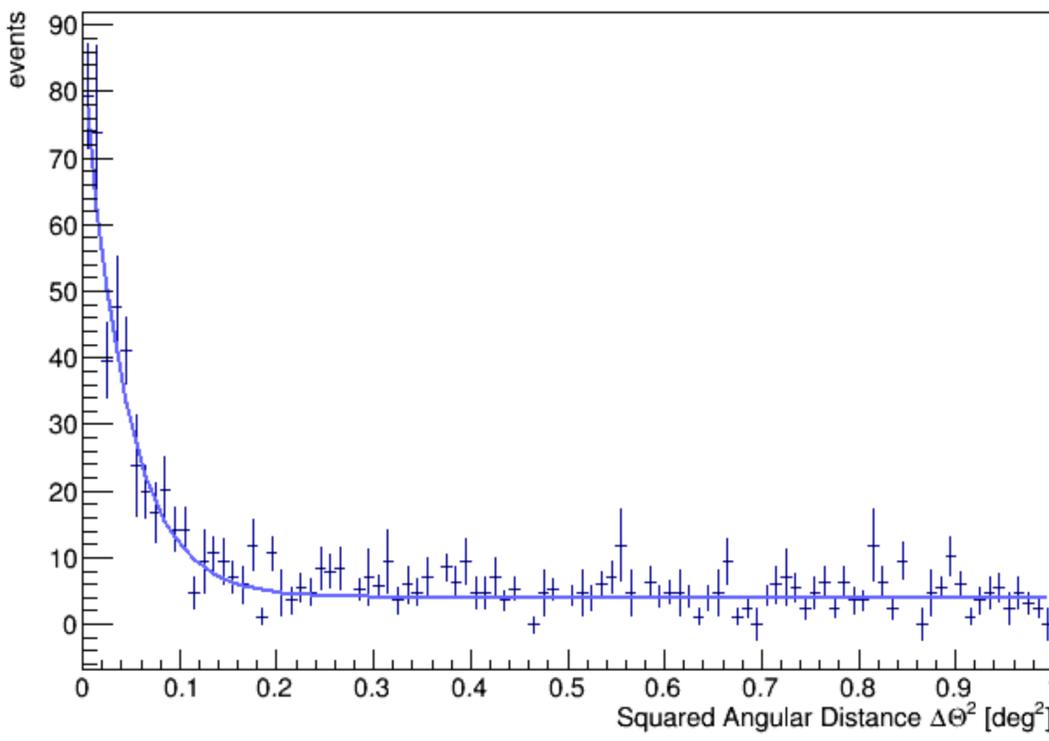
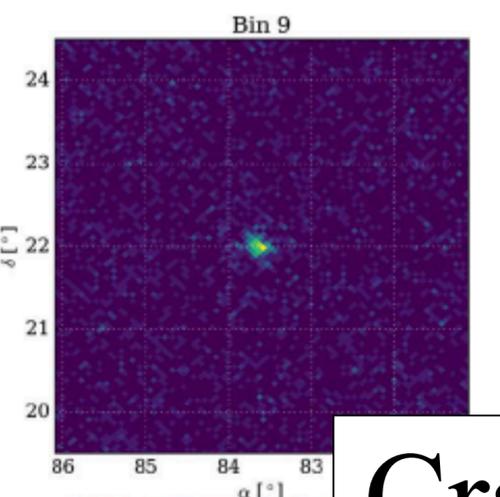
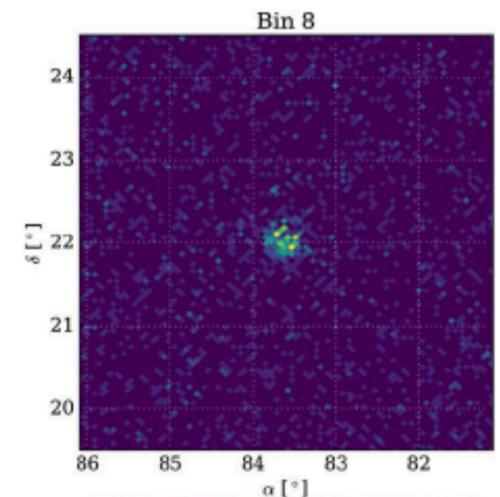
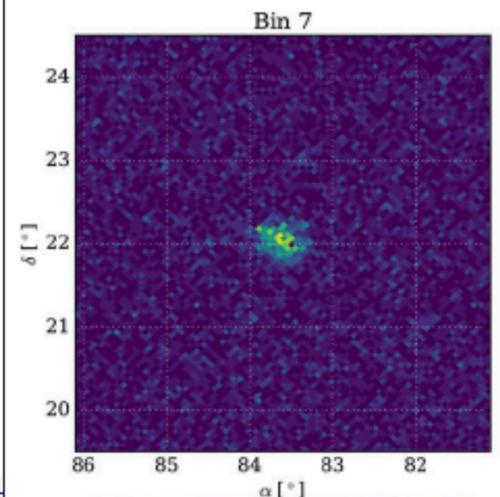
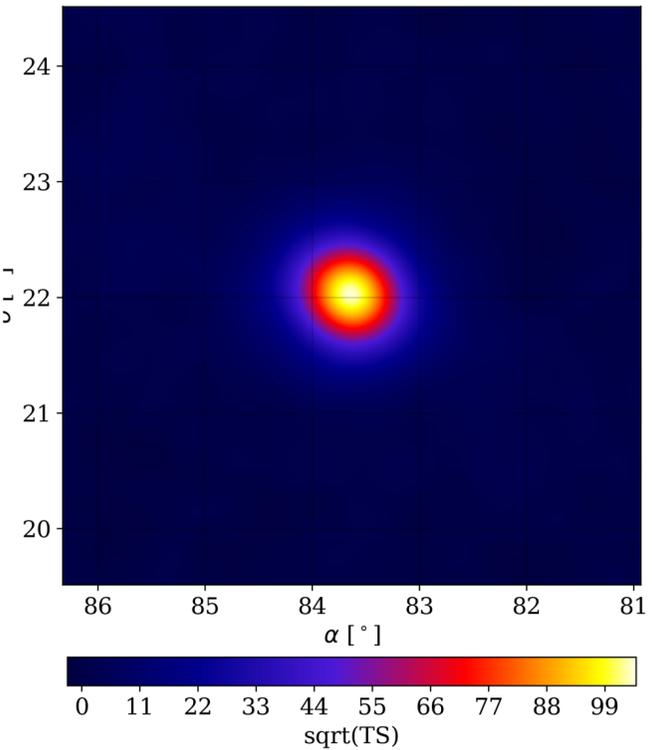
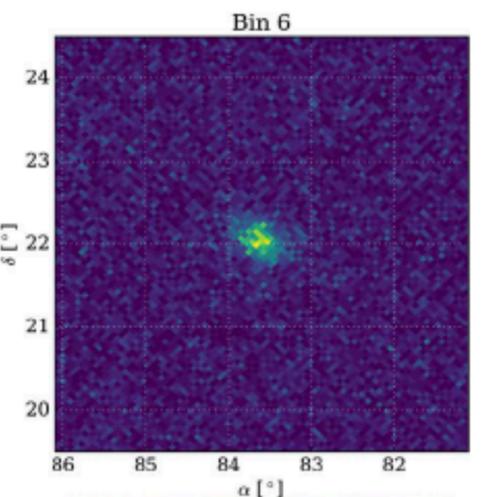
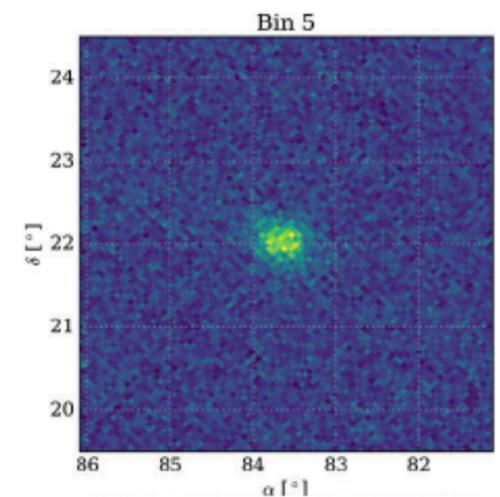
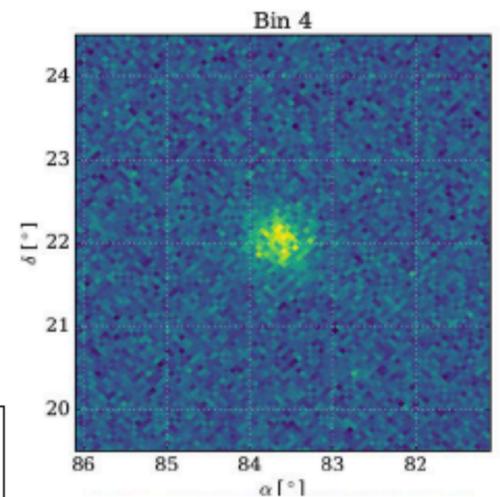
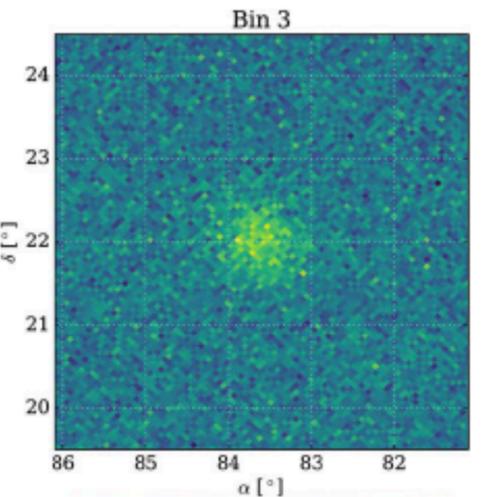
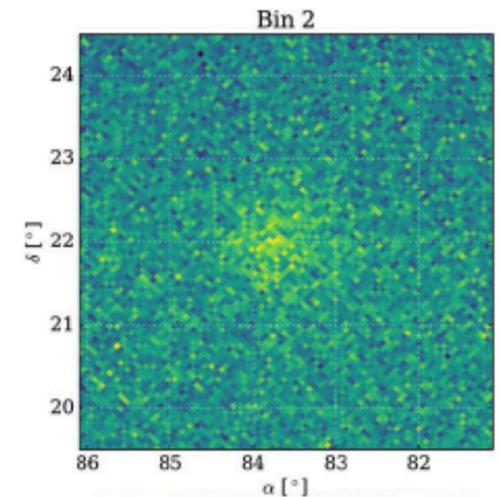
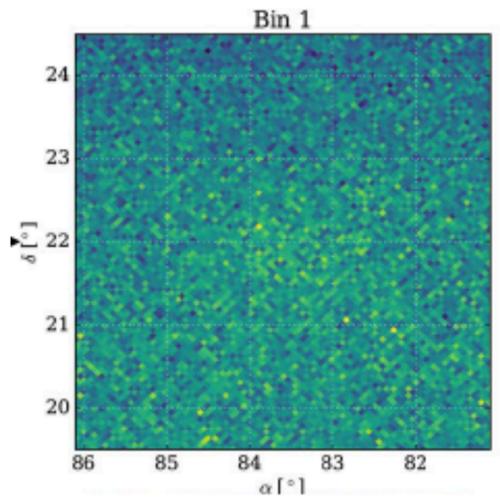
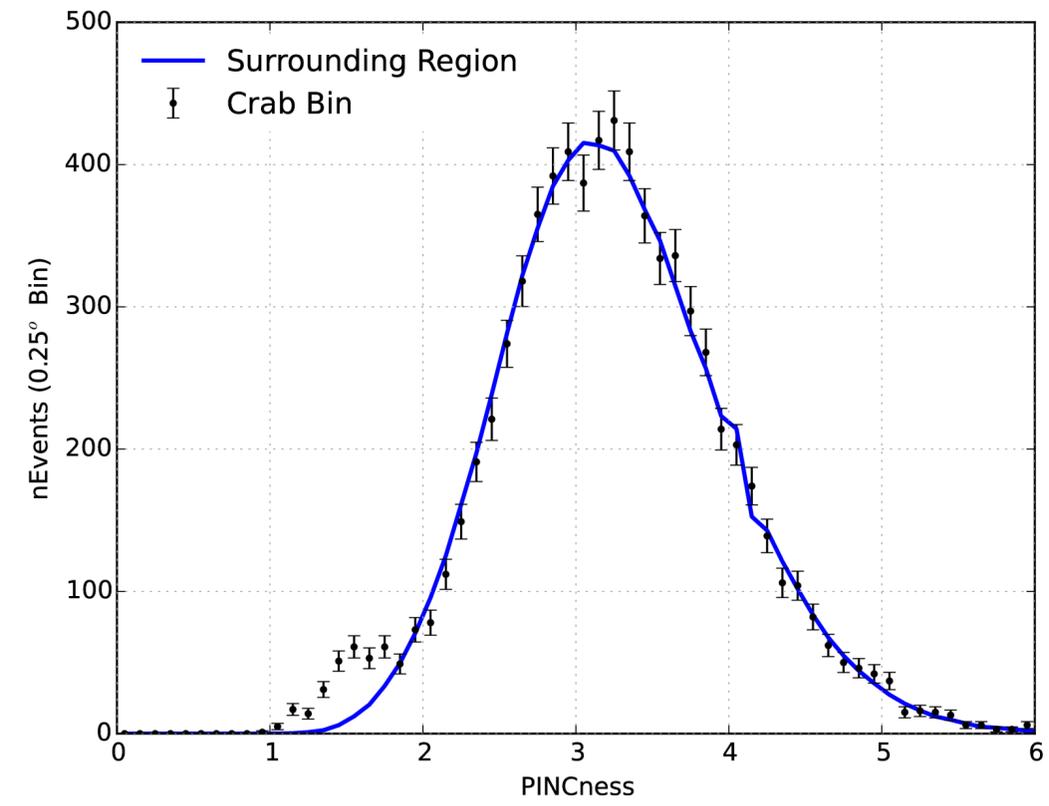


- Mediante la parametrización de la distribución de carga en la superficie:

- “Compactness”
- PINCness

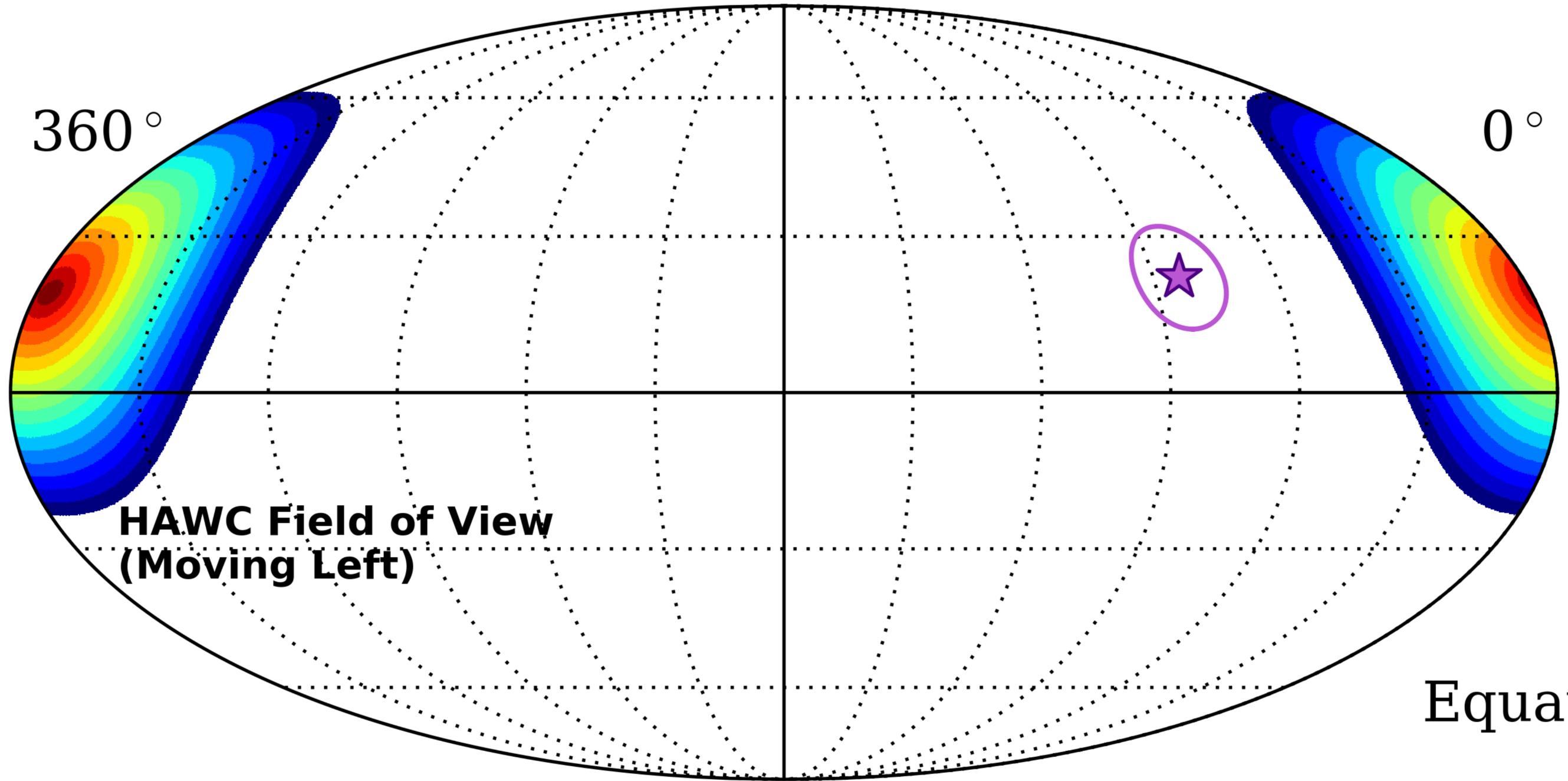
Hadron





Crab calibration
Abeysekara et al. (2017)

2015-12-26 00:00:00 [UTC]

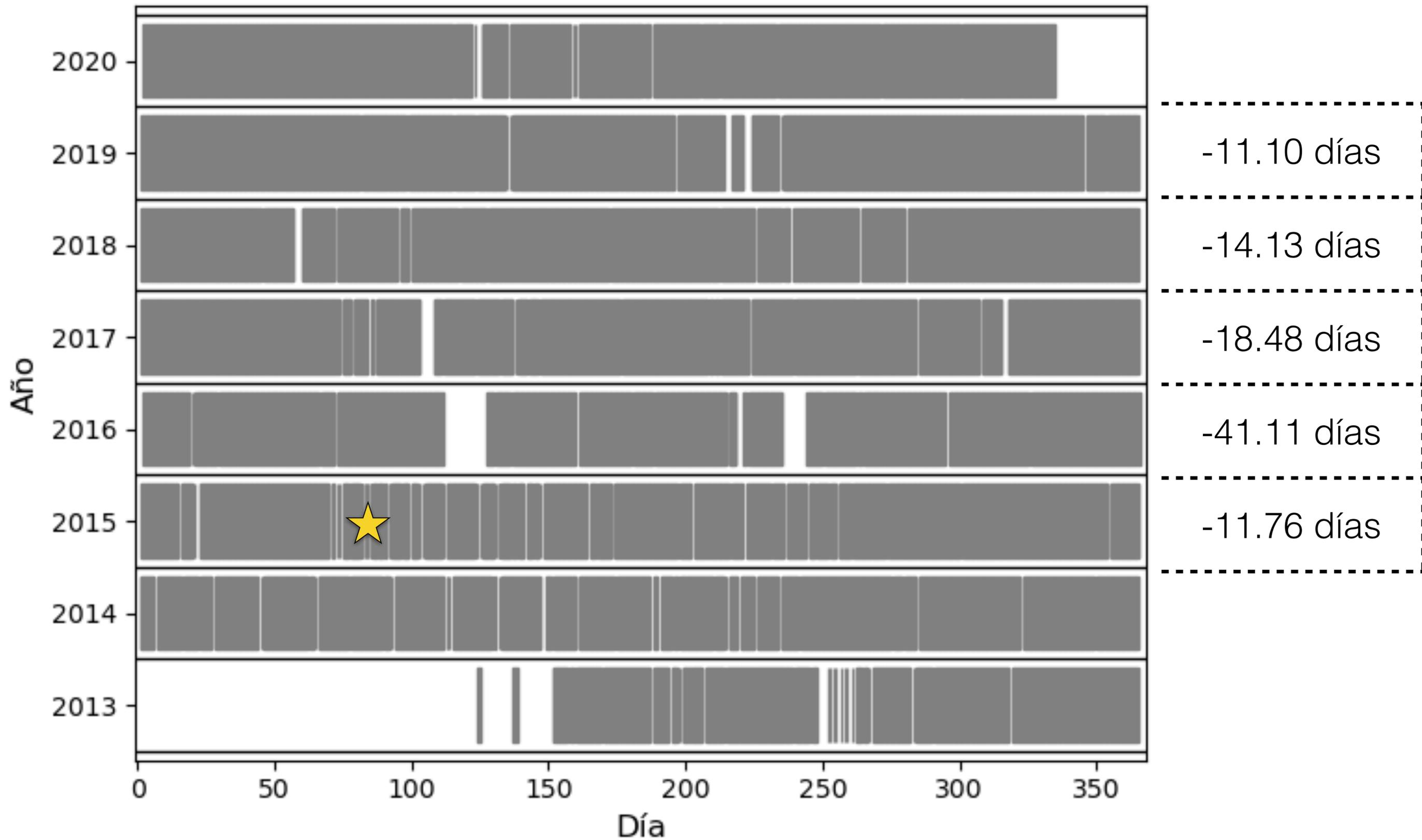


**HAWC Field of View
(Moving Left)**

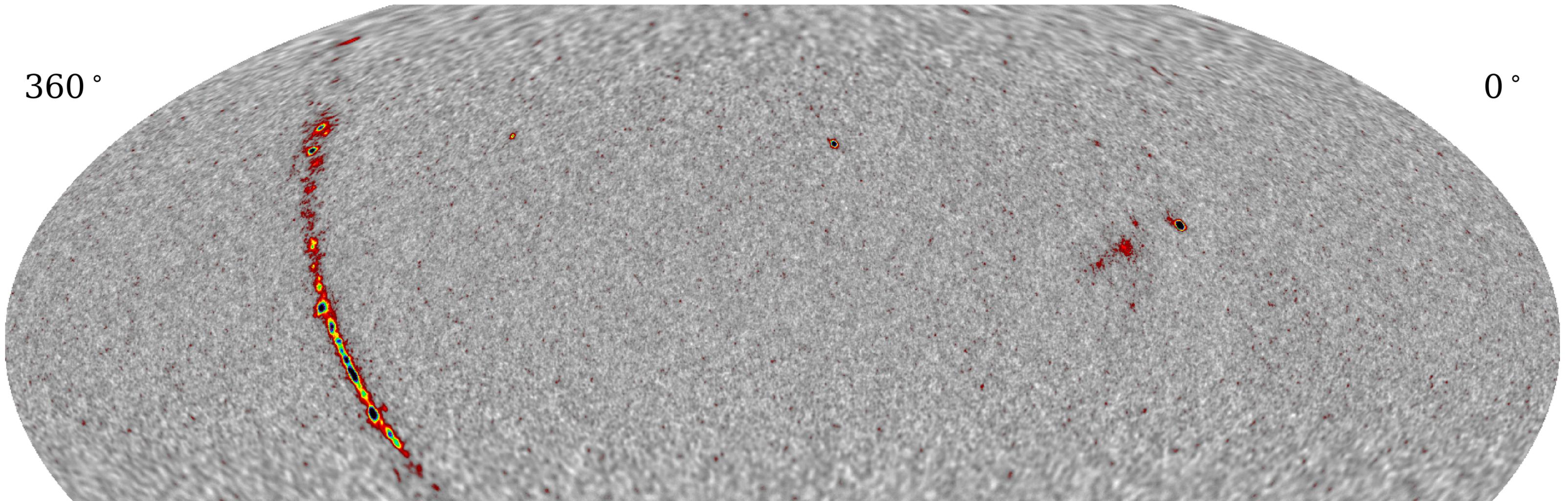
Equatorial

Datos de HAWC

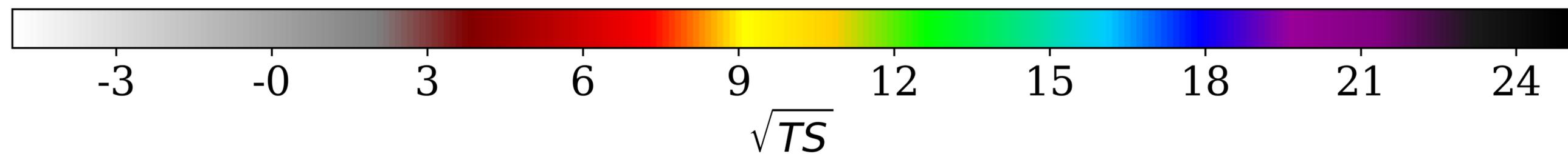
- HAWC en operación plena desde marzo 2015.
- Registra 25,000 eventos por segundo.
- Acumulado 2TB de datos al día. Se transportan y almacenan en los centros de datos del ICN-UNAM (6 Petabytes) y la U. Maryland (7.5 PB).
- Datos de noviembre de 2014 a junio de 2019: 1523 días efectivos → 3HWC y el survey de AGNs.
- HAWC mantuvo la operación sin interrupción durante la pandemia.



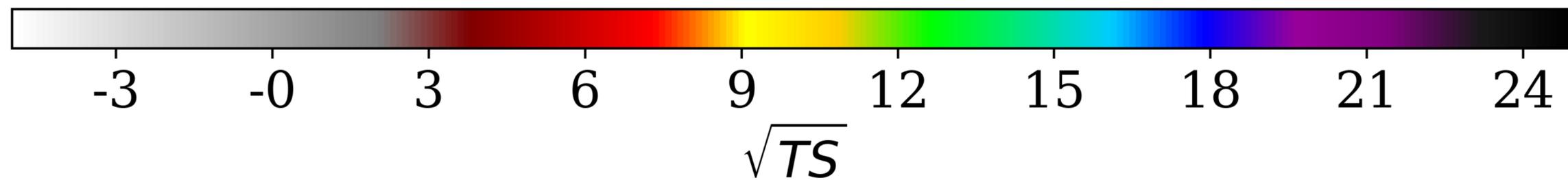
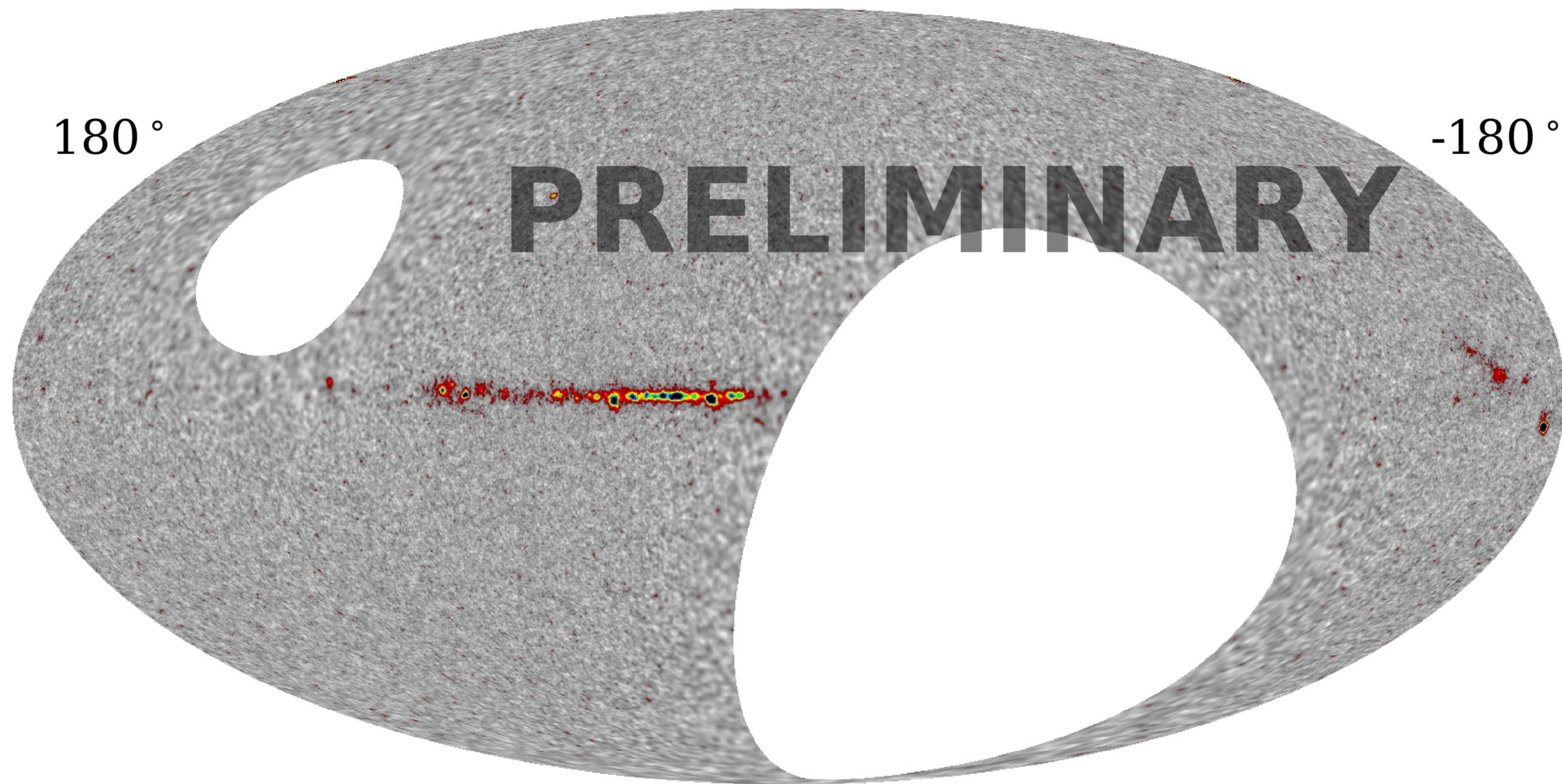
The 3HWC skymap



Albert et al. (2020; ApJ 905, 76)



All-sky view; galactic coordinates; 0.0° ; 1523 days

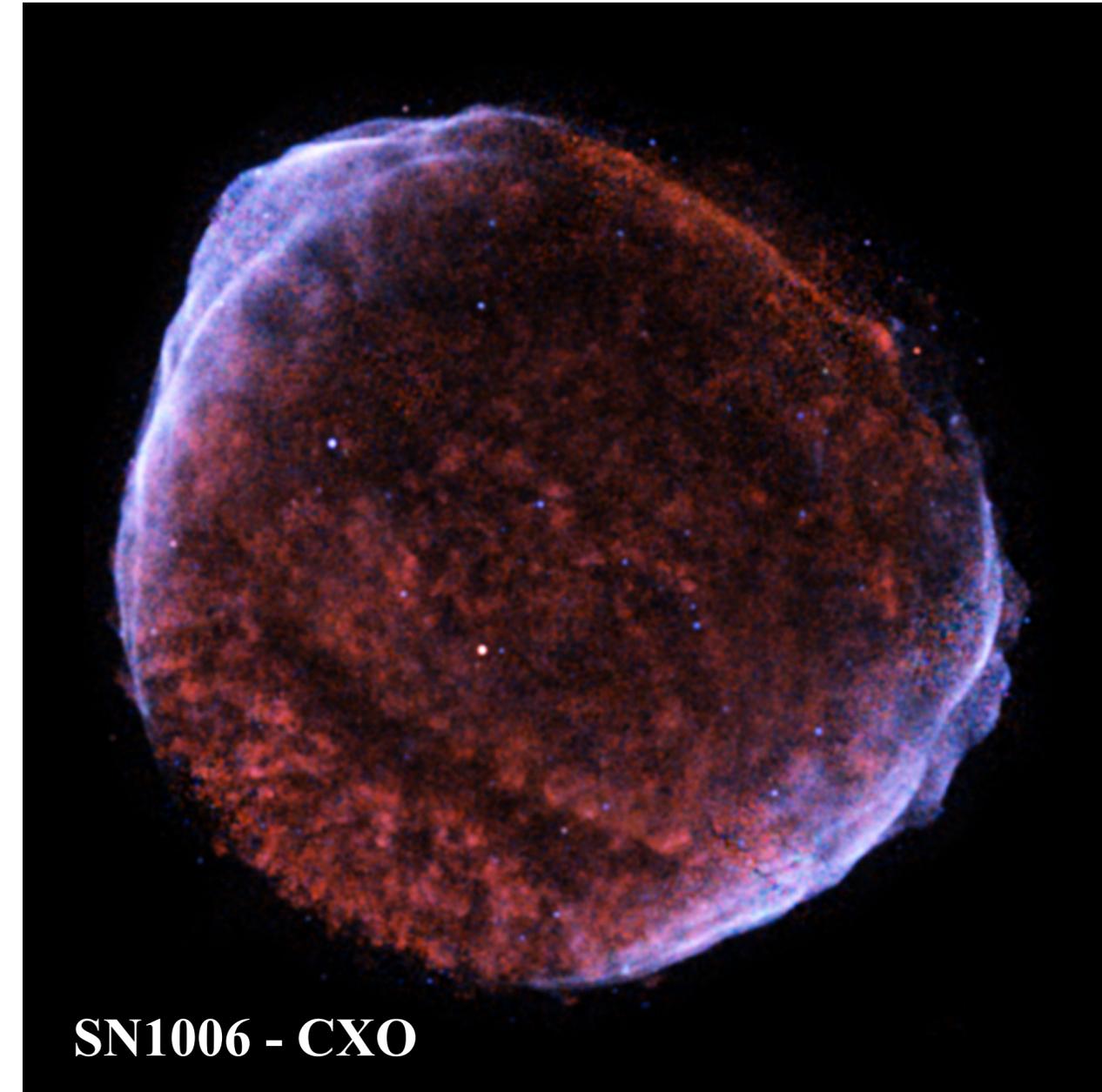


¿Supernovas: las fuentes de los rayos cósmicos?

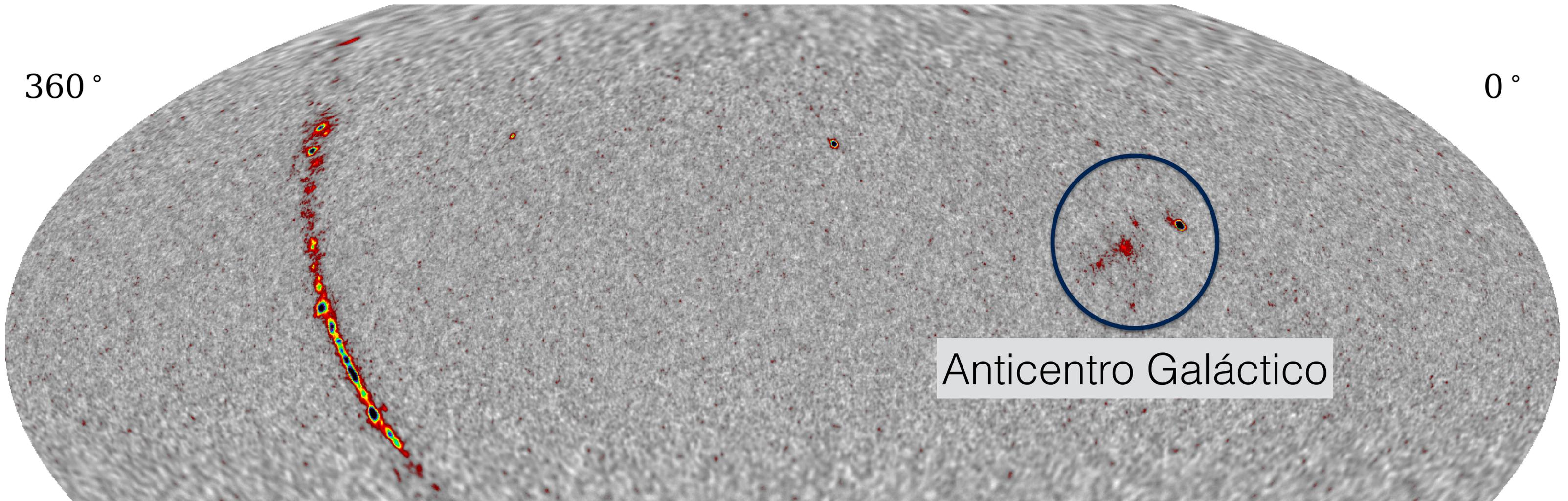
- La energética para proveer a la Galaxia de los rayos cósmicos:

$$L_{\text{CR}} \approx \frac{u_{\text{CR}} V_{\text{gal}}}{t_{\text{esc}}} \simeq 10^{40} \text{ erg/s} .$$

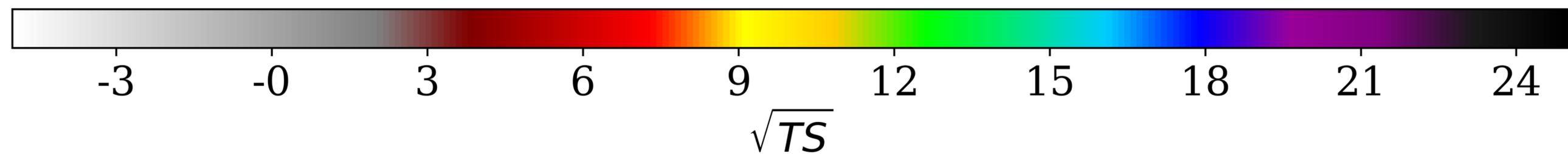
- Liberación de energía de las supernovas Galácticas:
 $\simeq 1 \text{ SN} / 30 \text{ años} \simeq 10^{51} \text{ erg} / 10^9 \text{ s} \simeq 10^{42} \text{ erg/s}$.
- Enrico Fermi mostró que los frentes de choque de las supernovas en expansión pueden producir partículas de alta energía con un espectro en ley de potencias.



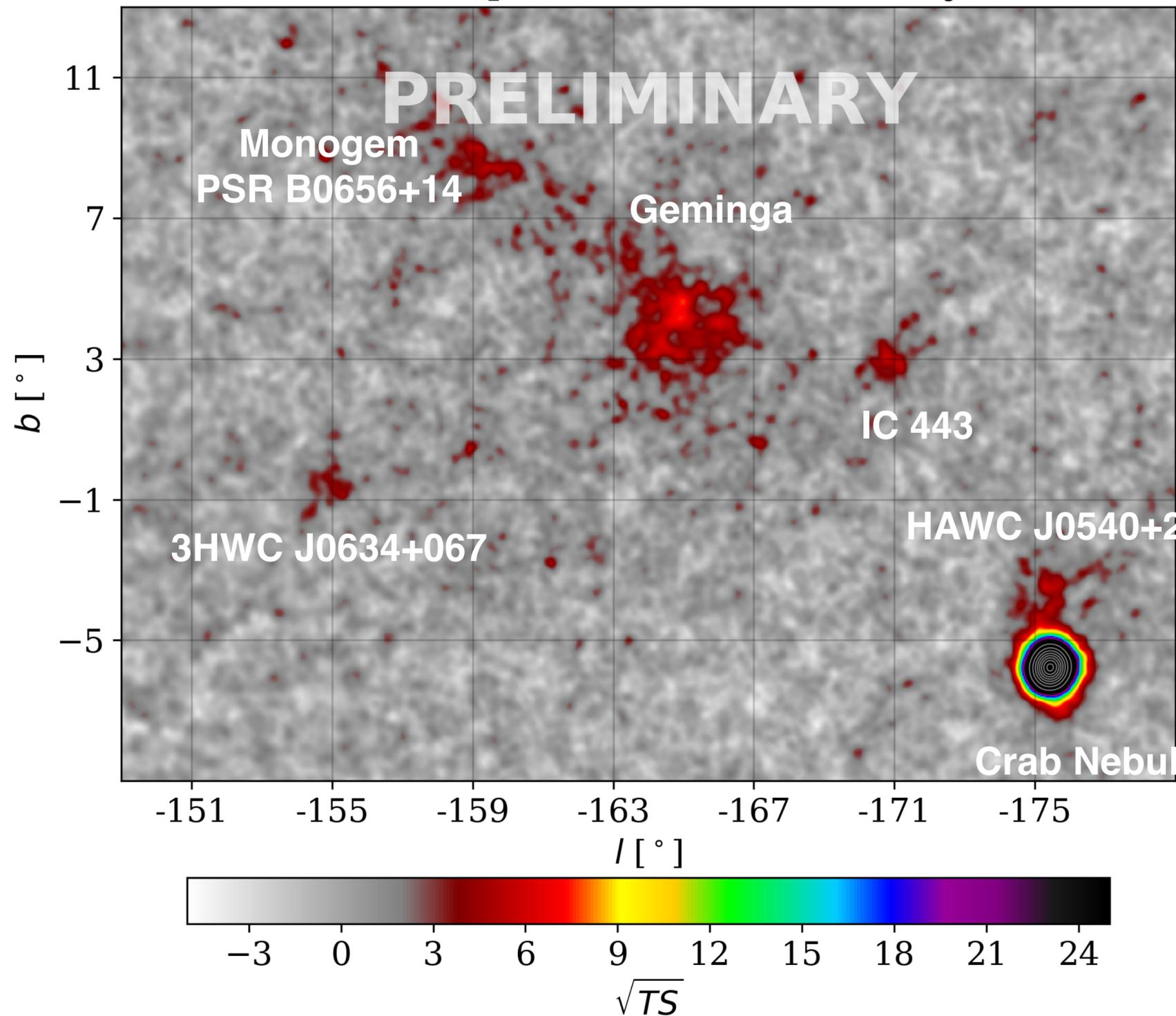
The 3HWC skymap



Albert et al. (2020; ApJ 905, 76)



Galactic plane V; 0.0°; 1523 days

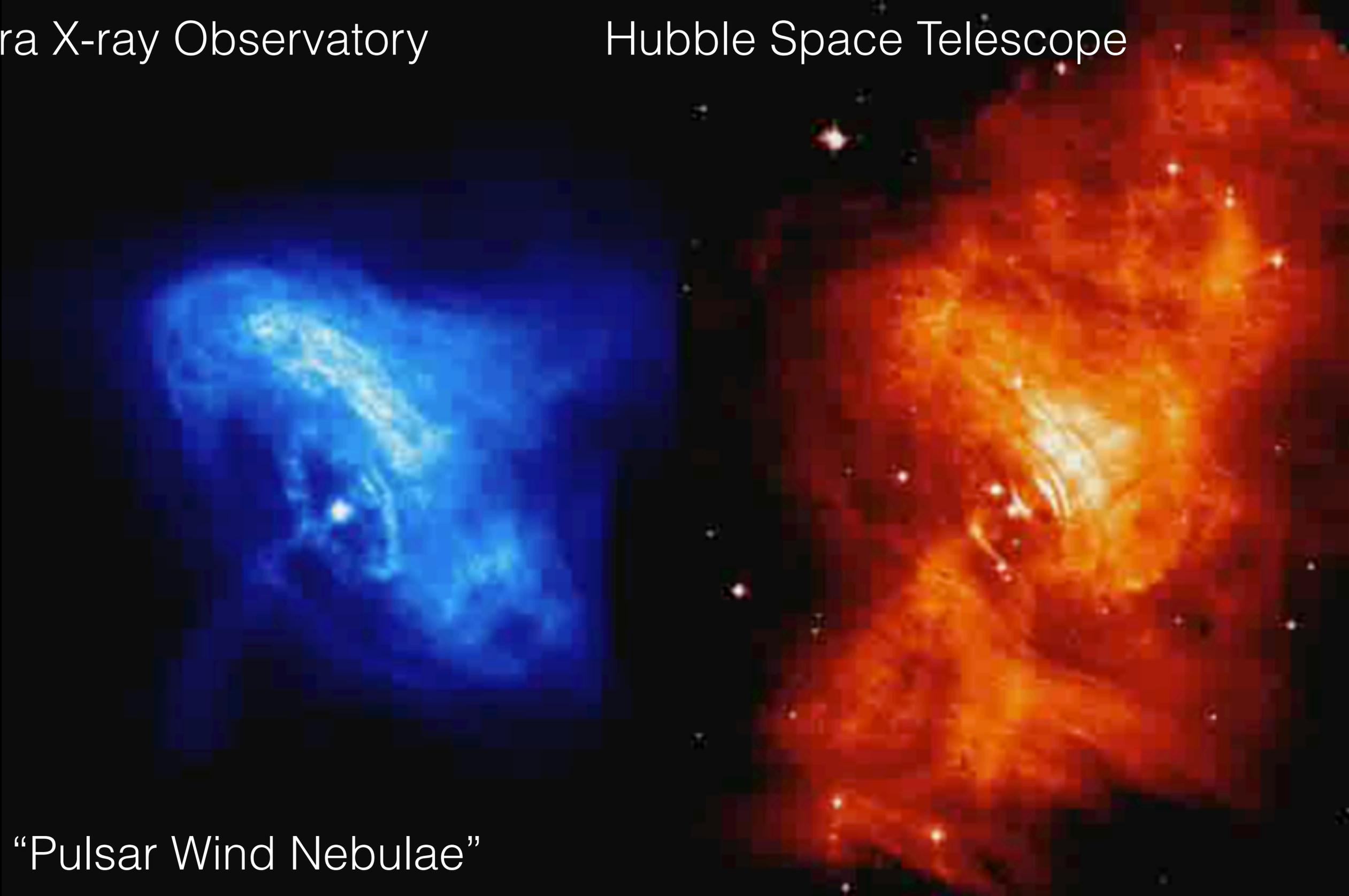


Anticentro Galáctico

- Fuentes alimentadas por pulsares:
 - Crab Nebula (Pulsar Wind Nebula PWN);
 - Geminga & Monogem (PSR B0656+14) TeV haloes!
 - HAWC J0540+233 (PSR B0540+23) TeV halo?
 - 3HWC J0634+067 (PSR J0633+0632) TeV halo?
- Frentes de supernova: SNR IC 443.

Chandra X-ray Observatory

Hubble Space Telescope



The Crab “Pulsar Wind Nebulae”

M1 



La Luna (misma escala)

Geminga

PSR B0656+14

(c) 2017 HAWC Collaboration
Creative Commons Attribution Share Alike 3.0
Moon Image: (c) Gregory H. Revera



“TeV haloes”

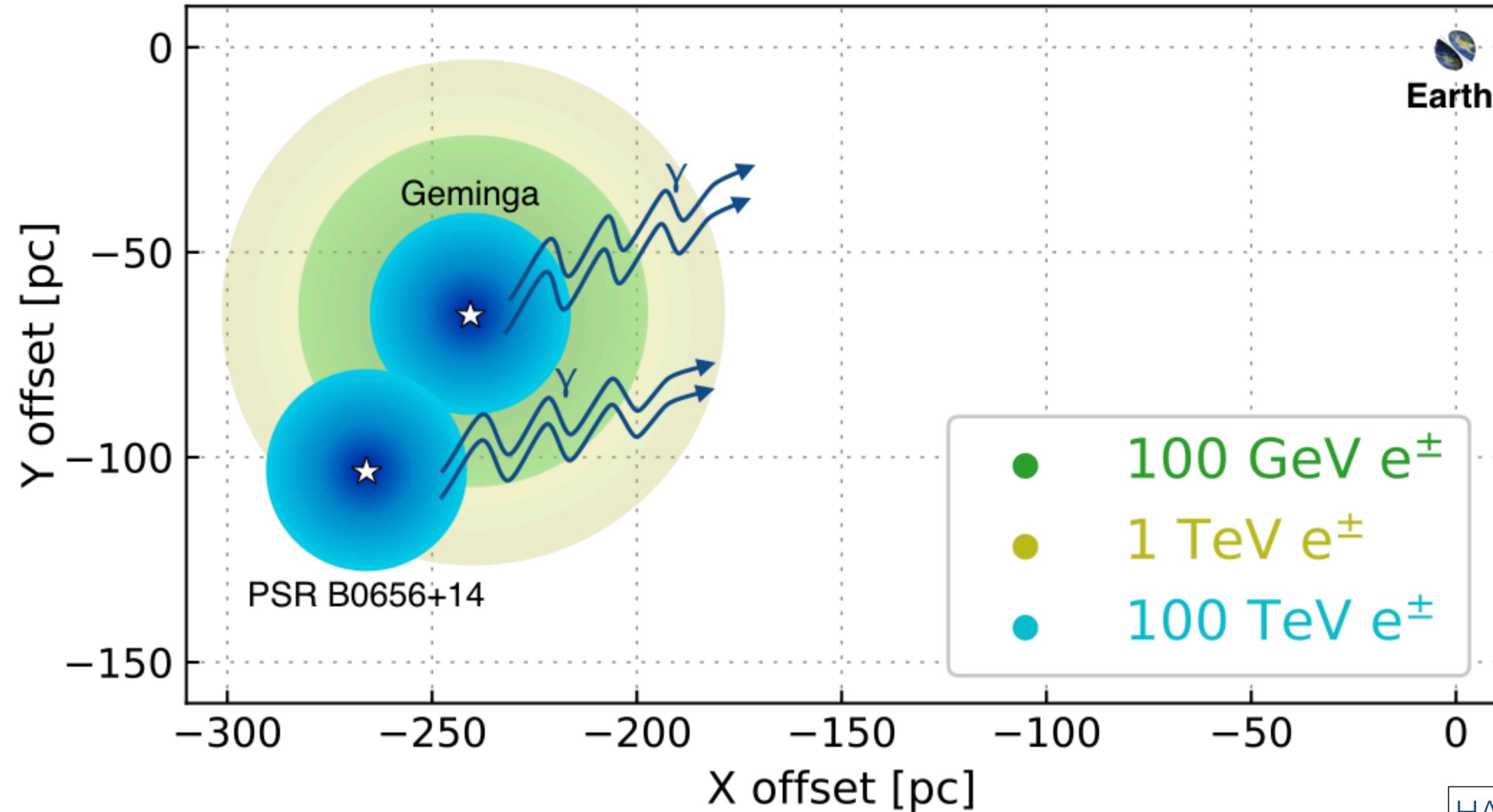
Halos de radiación y electrones con energías de TeV



HAWC aceleradores @ ICN-UNAM - abril 2021

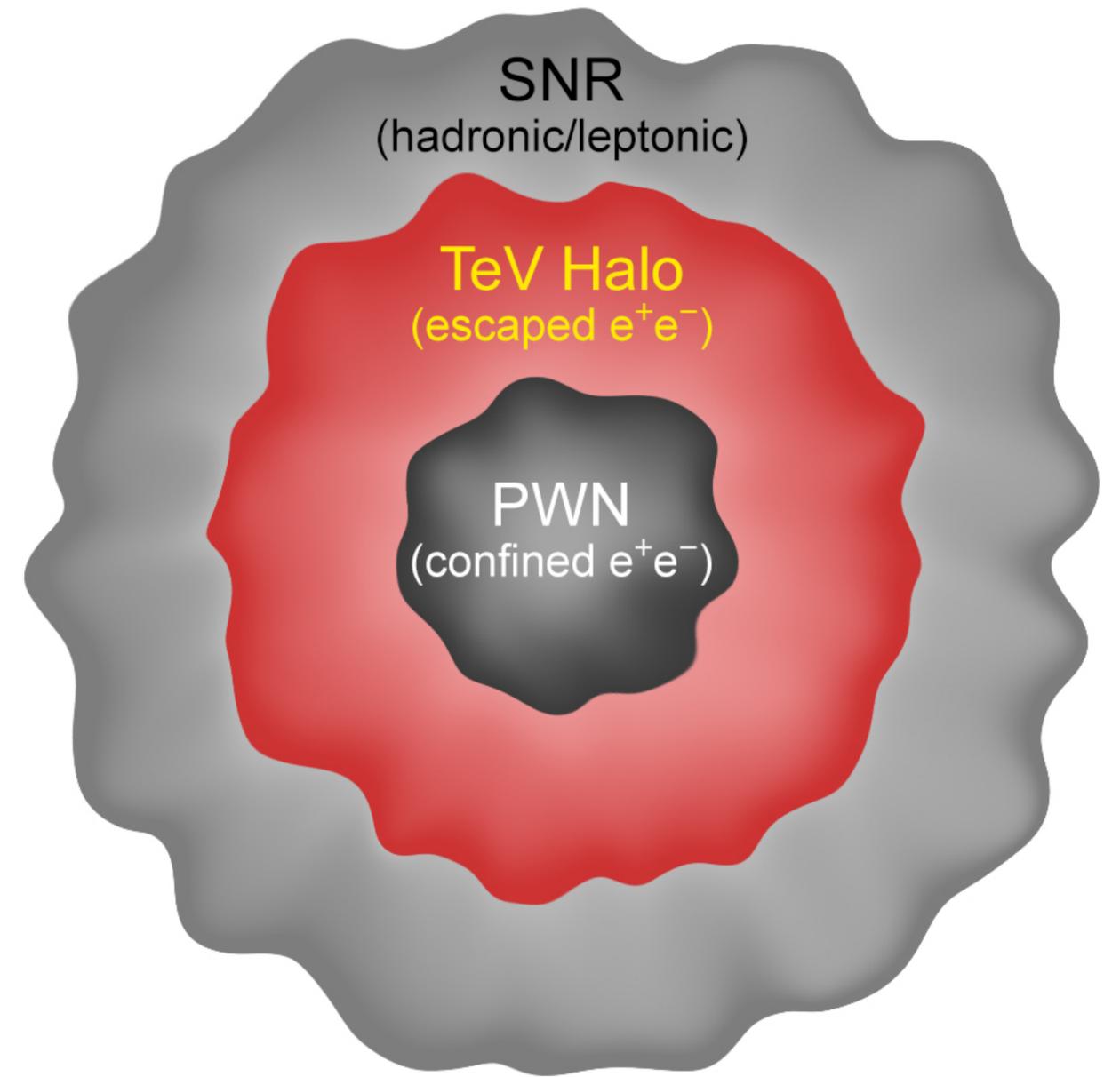
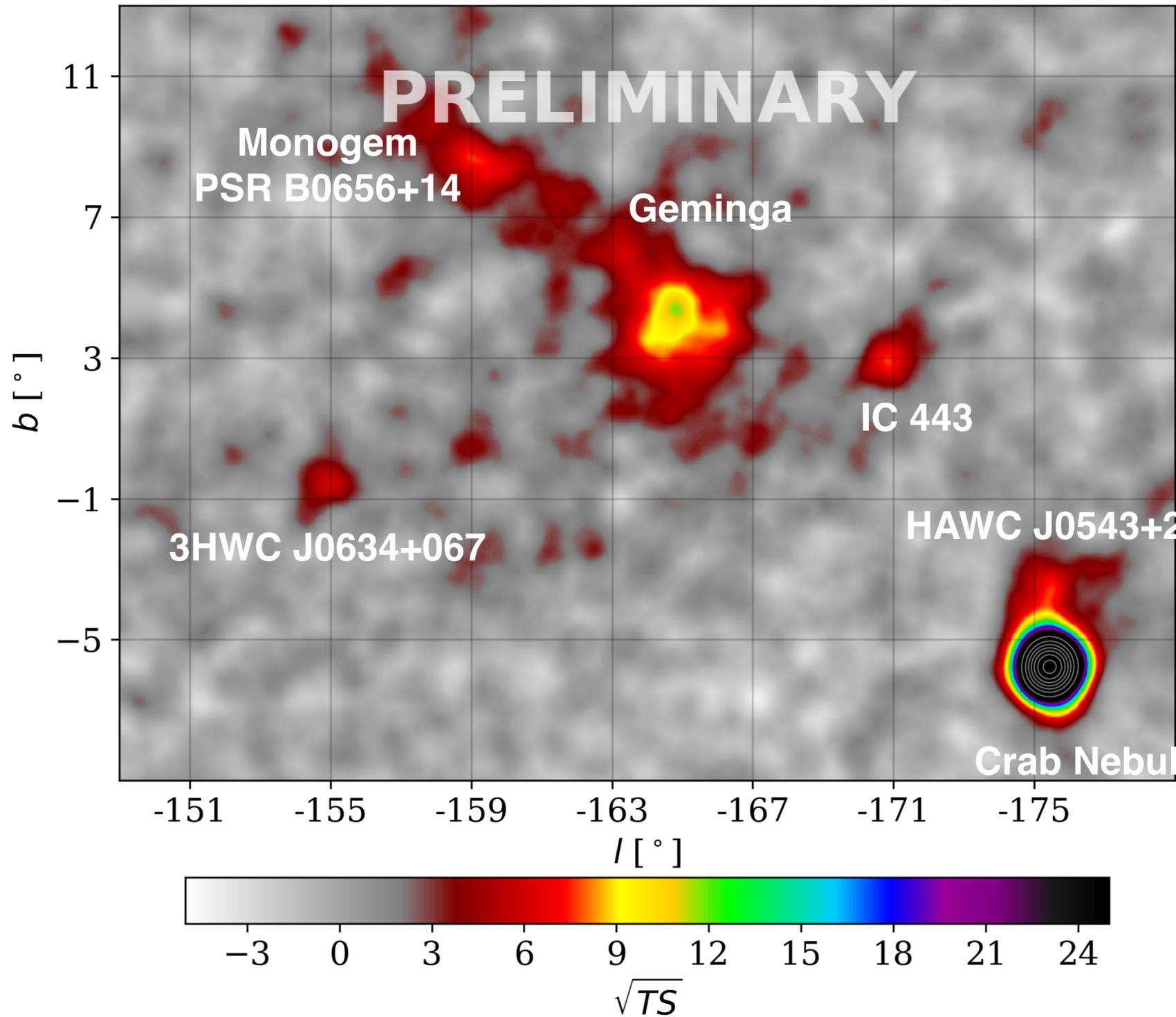


Pulsares y el exceso de positrones cósmicos



HAWC, Science 358, 911 (2017)

Galactic plane V; 0.5°; 1523 days



Esquema PWN \rightarrow TeV halo,
rodeados por frente SNR
(Sudoh, Linden & Beacom 2019)

Pulsar power

- Energía rotacional:

$$\frac{dE_{\text{rot}}}{dt} = -4\pi^2 I \frac{\dot{P}}{P^3} = 2.6 \times 10^{38} \text{ erg/s} \left(\frac{\dot{P}}{4.2 \times 10^{-13}} \right) \left(\frac{P}{33 \text{ ms}} \right)^{-3}$$

- Campo magnético:

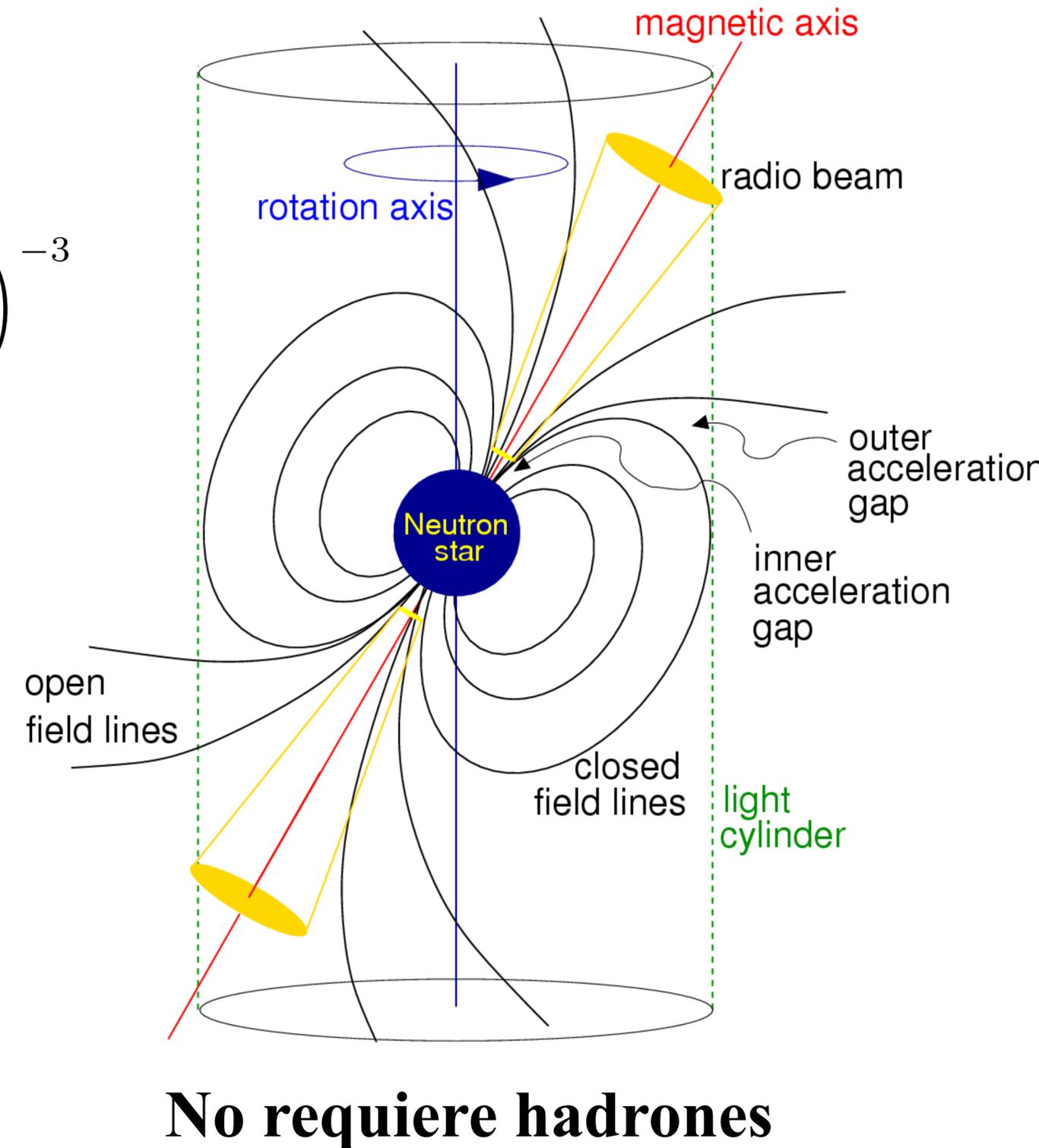
$$B_{\star} = 2.8 \times 10^{12} \text{ G} \left(\frac{P \dot{P}}{33 \text{ ms} \cdot 4.2 \times 10^{-13}} \right)^{1/2}$$

- Potential de aceleración de partículas:

$$\Delta\Phi \approx \frac{B_{\star} \Omega^2 R_{\star}^3}{2c^2} \simeq 1.1 \times 10^{16} \text{ V} \left(\frac{P}{33 \text{ ms}} \right)^{-3/2} \left(\frac{\dot{P}}{4.2 \times 10^{-13}} \right)^{1/2}$$

- Tiempo de vida:

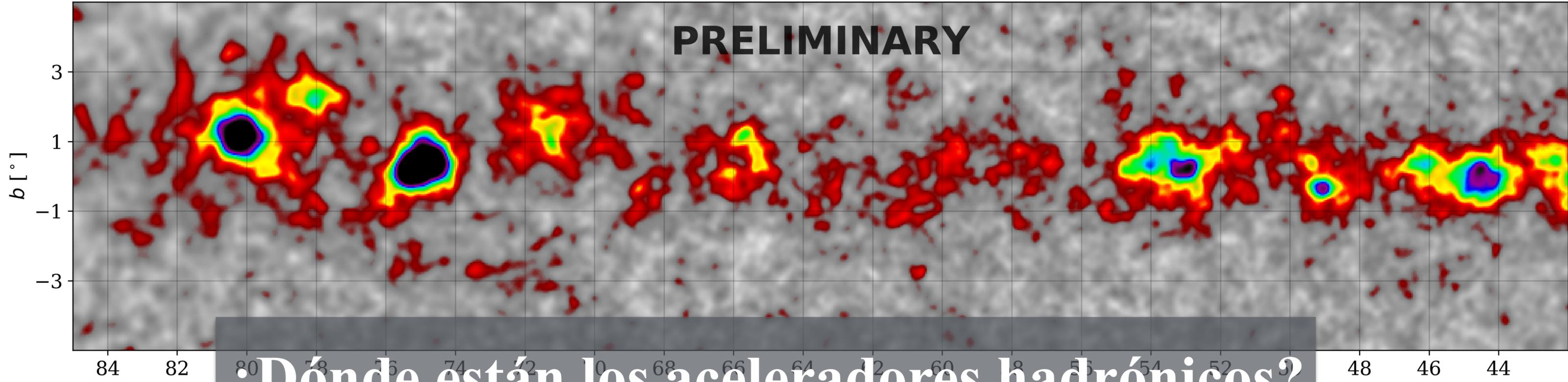
$$\tau = P/2\dot{P} = 1273 \text{ years} \left(\frac{P/33 \text{ ms}}{\dot{P}/4.2 \times 10^{-13}} \right)$$



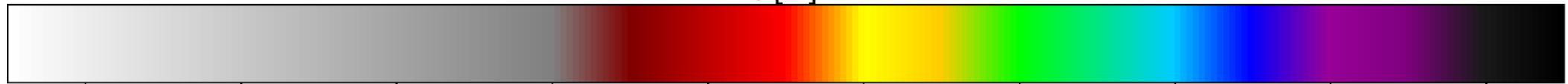
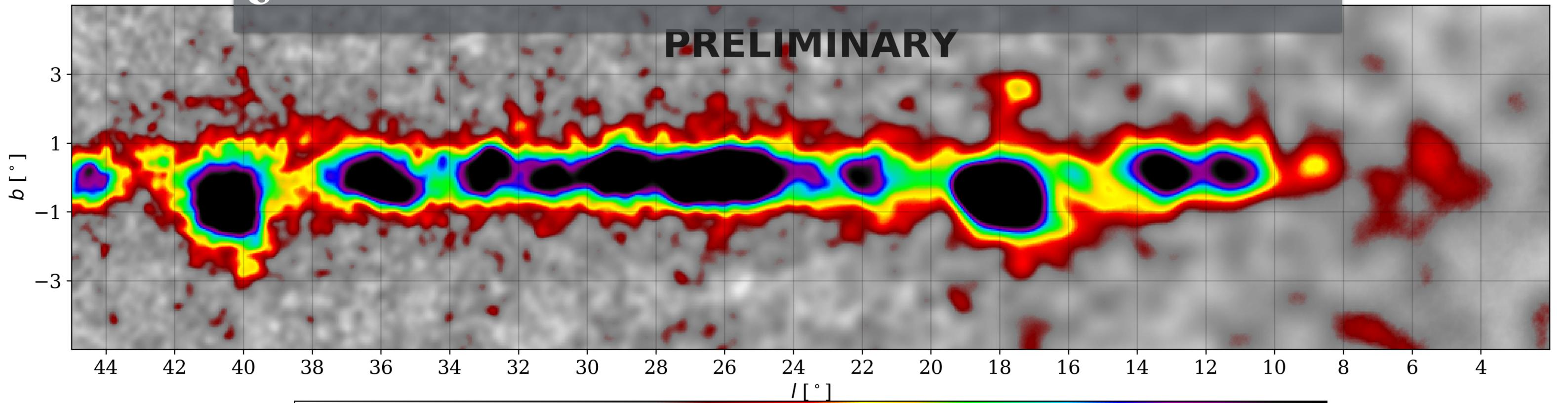
¿Hadrones por pulsares?

- Pulsares producen y aceleran leptones e^\pm , probablemente hasta energías PeV.
- Leptones pueden producir rayos γ de alta energía mediante Compton inverso.
- Pero! Compton inverso limitado por la sección eficaz KN (función de $\gamma\hbar\omega$):
 - fotones con energías $\gtrsim 100$ TeV pueden producirse con el CMB;
 - electrones con $\gtrsim 100$ TeV pierden energía rápido en entornos magnetizados.
- Hadrones de alta energía “*deben ser*” producidos en choques, como frentes de SN o vientos de estrellas masivas.

Al producir hadrones se producen neutrinos.



¿Dónde están los aceleradores hadrónicos?

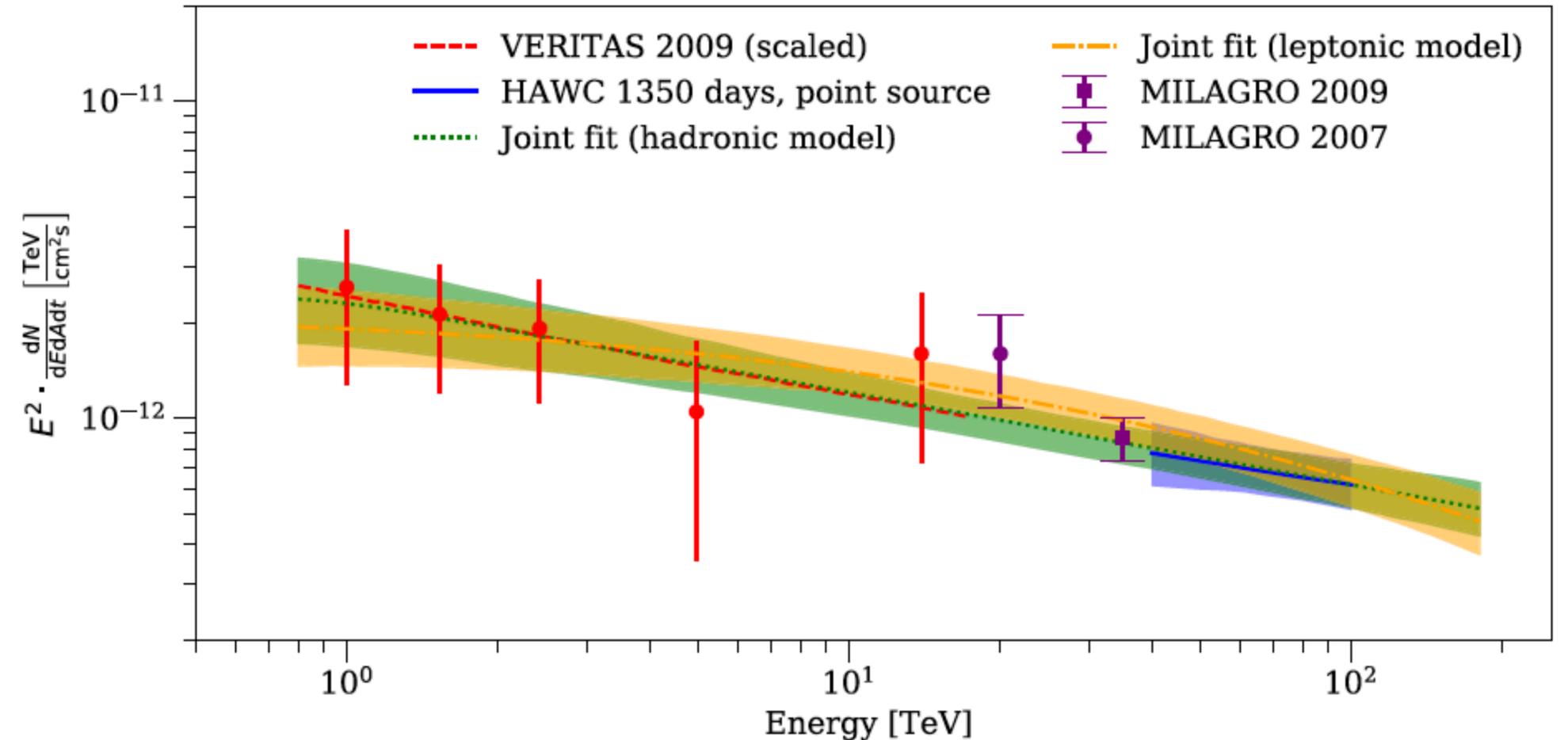
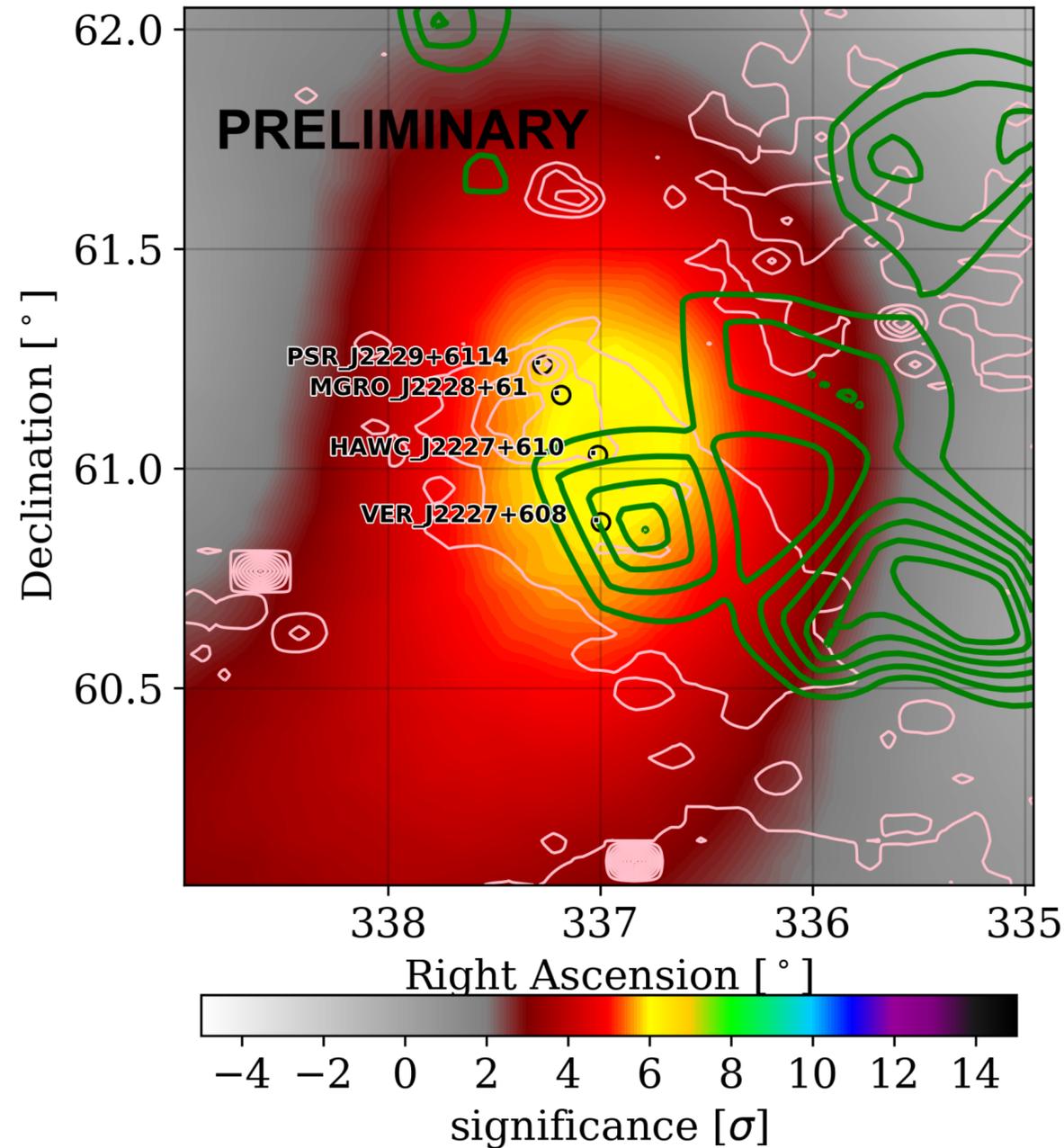


-4 -2 0 2 4 6 8 10 12 14

significance [σ]

HAWC J2227+610

- Asociación mas probable: SNR G106.3+2.7.
- Sin descartar naturaleza leptónica (PSR J2229+6114).



Albert et al. (2020, ApJ 896, L23)

Regiones de formación estelar



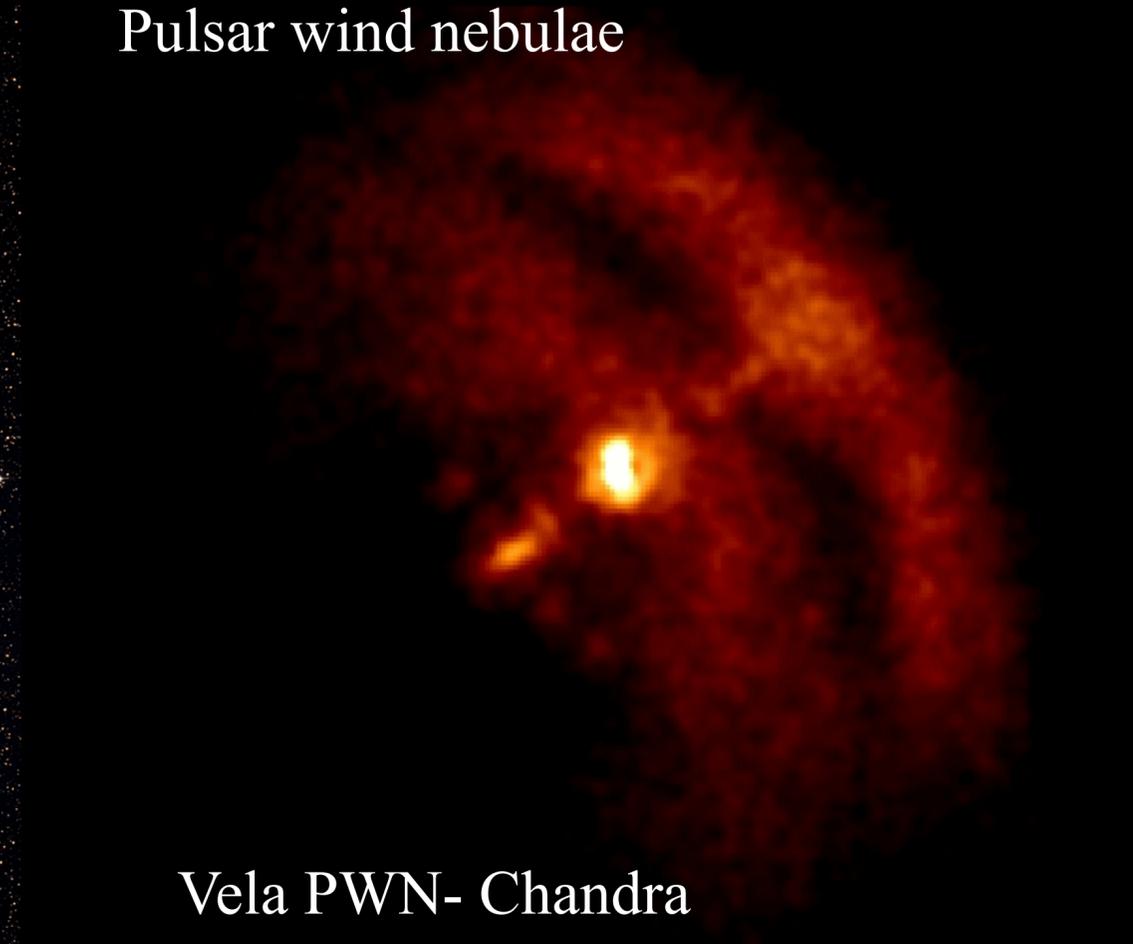
Cygnus - Spitzer

Remanentes de supernova

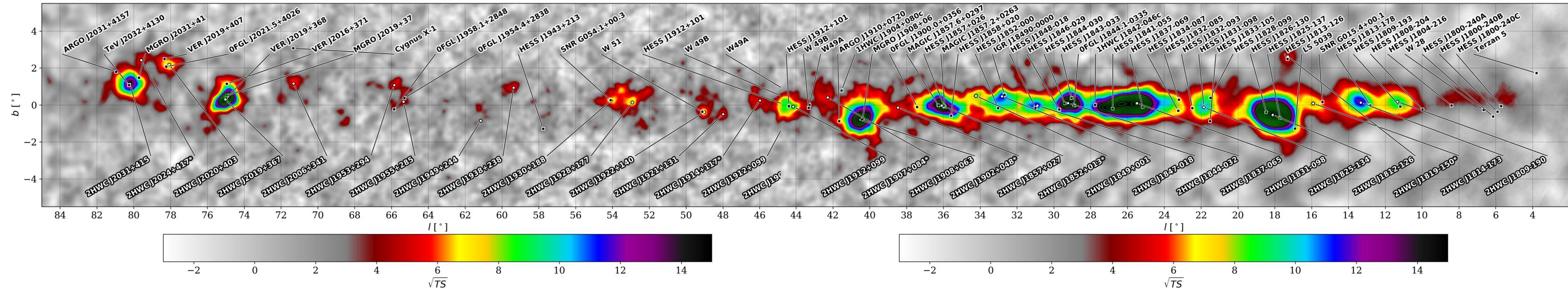


SN 1006 - Chandra

Pulsar wind nebulae

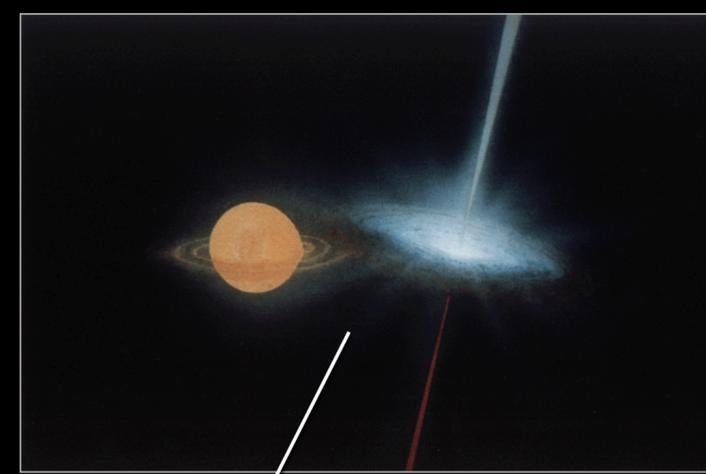


Vela PWN- Chandra

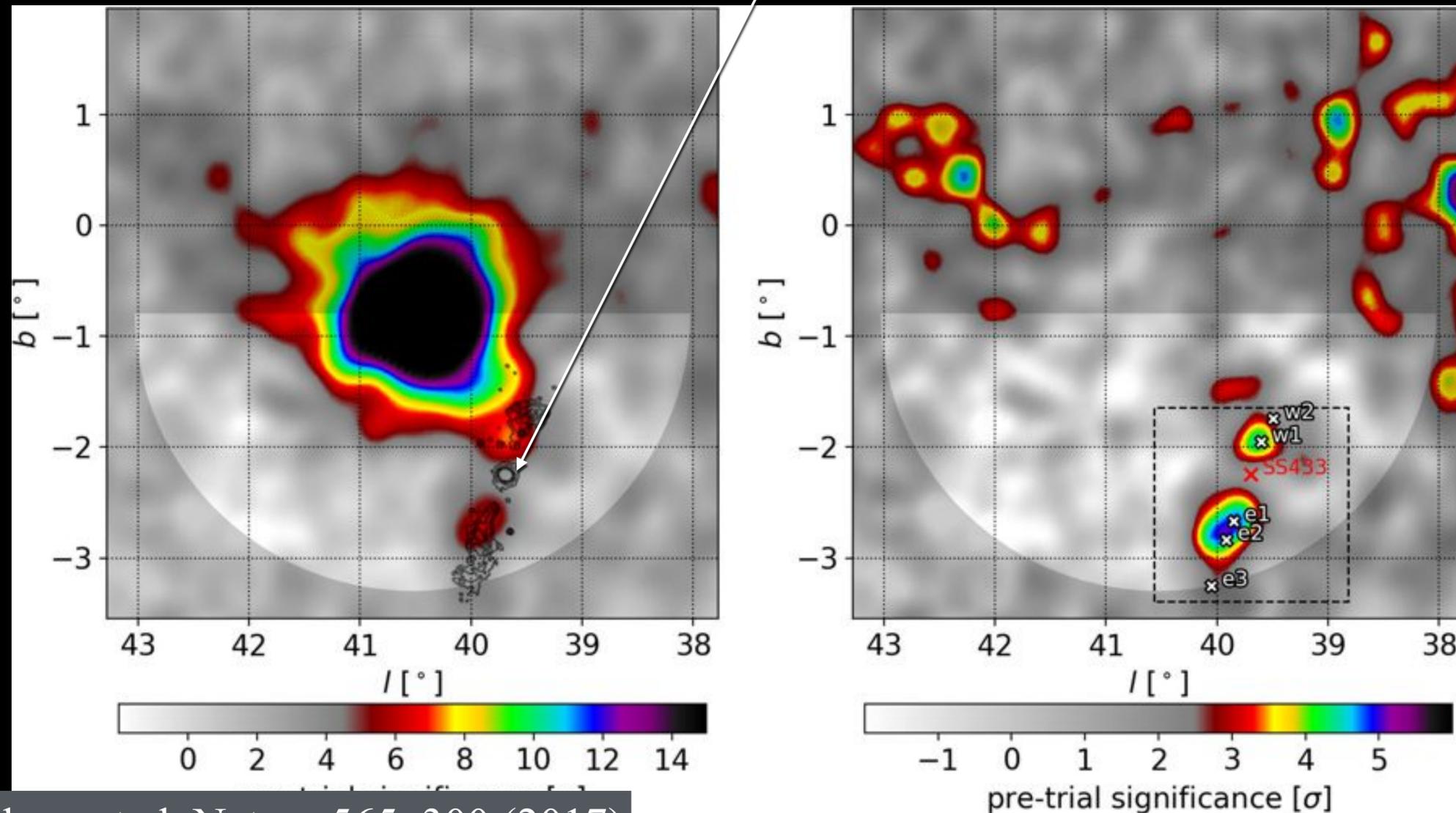


El microcuasar SS 433

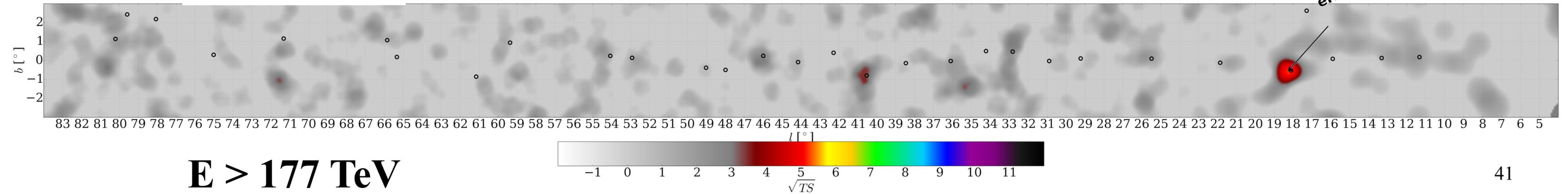
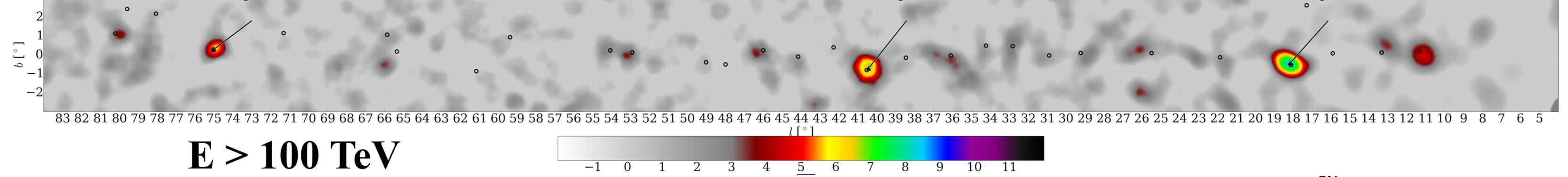
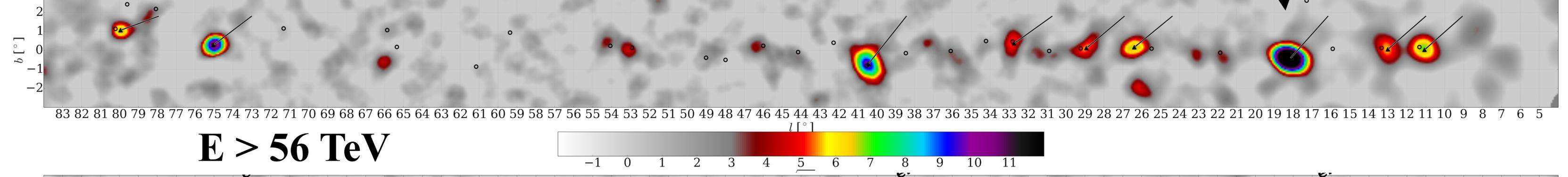
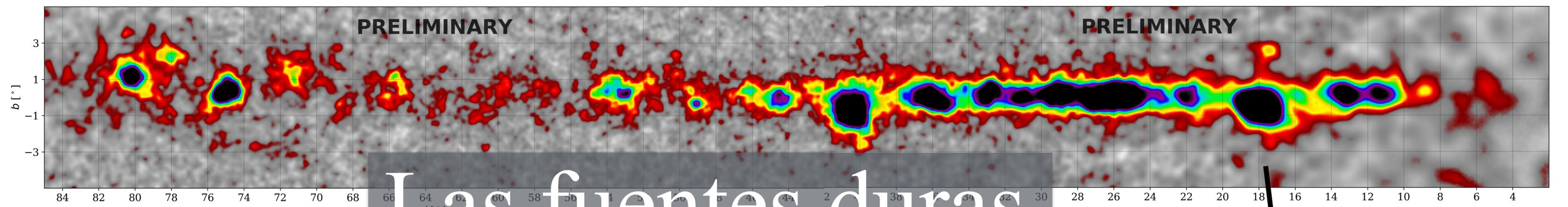
- SS 433: sistema estelar binario con un hoyo negro (componente $>10 M_{\odot}$).
- Espectroscopía óptica muestra movimientos a $0.26c$.
- Emisión coincidente con lóbulos de rayos X; alcanza $> 25 \text{ TeV}$.
- Los datos prefieren un modelo leptónico sobre hadrónico.



NASA - <https://apod.nasa.gov/apod/ap960306.html>

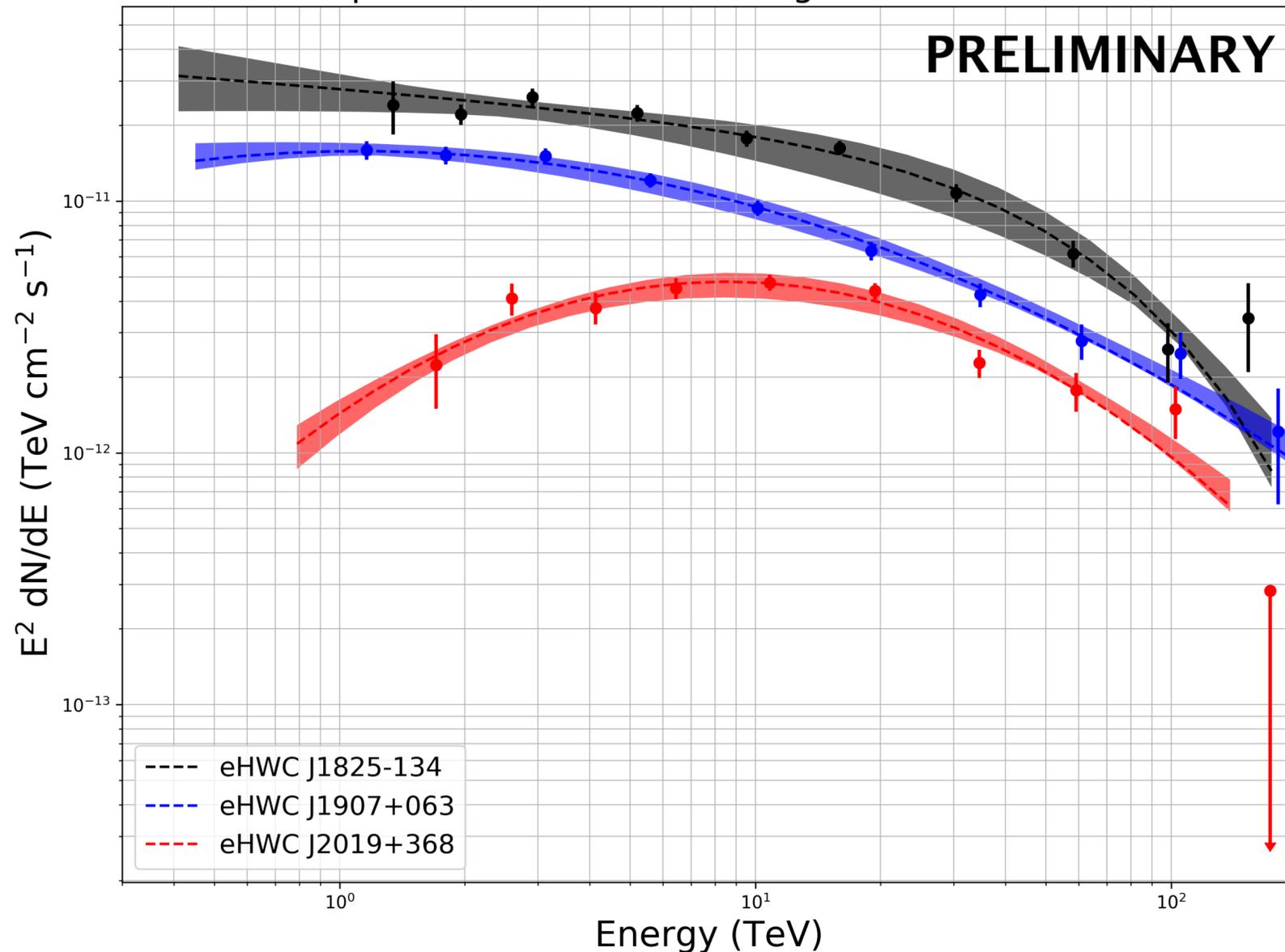


Abeysekara et al. Nature 565, 300 (2017)



Las fuentes duras

Spectra of sources emitting above 100 TeV



Source	p-Value	E_c (95%)	E_c (3σ)
eHWC J1825-134	1.000	244 TeV	158 TeV
eHWC J1907+063	0.990	218 TeV	162 TeV
eHWC J0534+220 (Crab Nebula)	1.000	152 TeV	104 TeV
eHWC J2019+368	0.828	120 TeV	88 TeV

PRL 124, 021102 (2020)

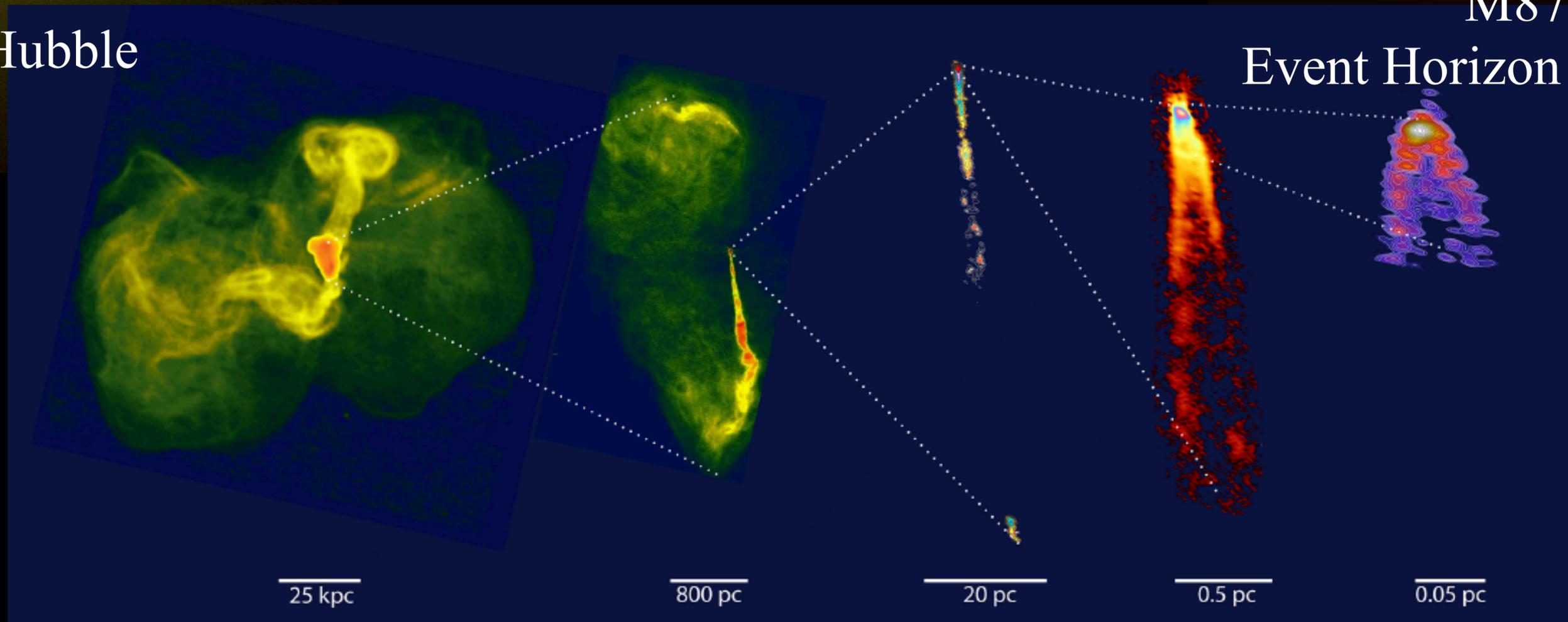
- Escenarios hadrónicos favorecidos por el límite leptónico de Compton inverso del CMB.
- Evidencia de emisión encima de 200 TeV en HAWC J1825-134 (ApJ 907, L30 - 2021).
- Tests de invariancia de Lorentz - (PRL 124, 131101 - 2020).

Núcleos Activos de Galaxias

M87 - Hubble

M87

Event Horizon Telescope
Event Horizon Telescope Collaboration



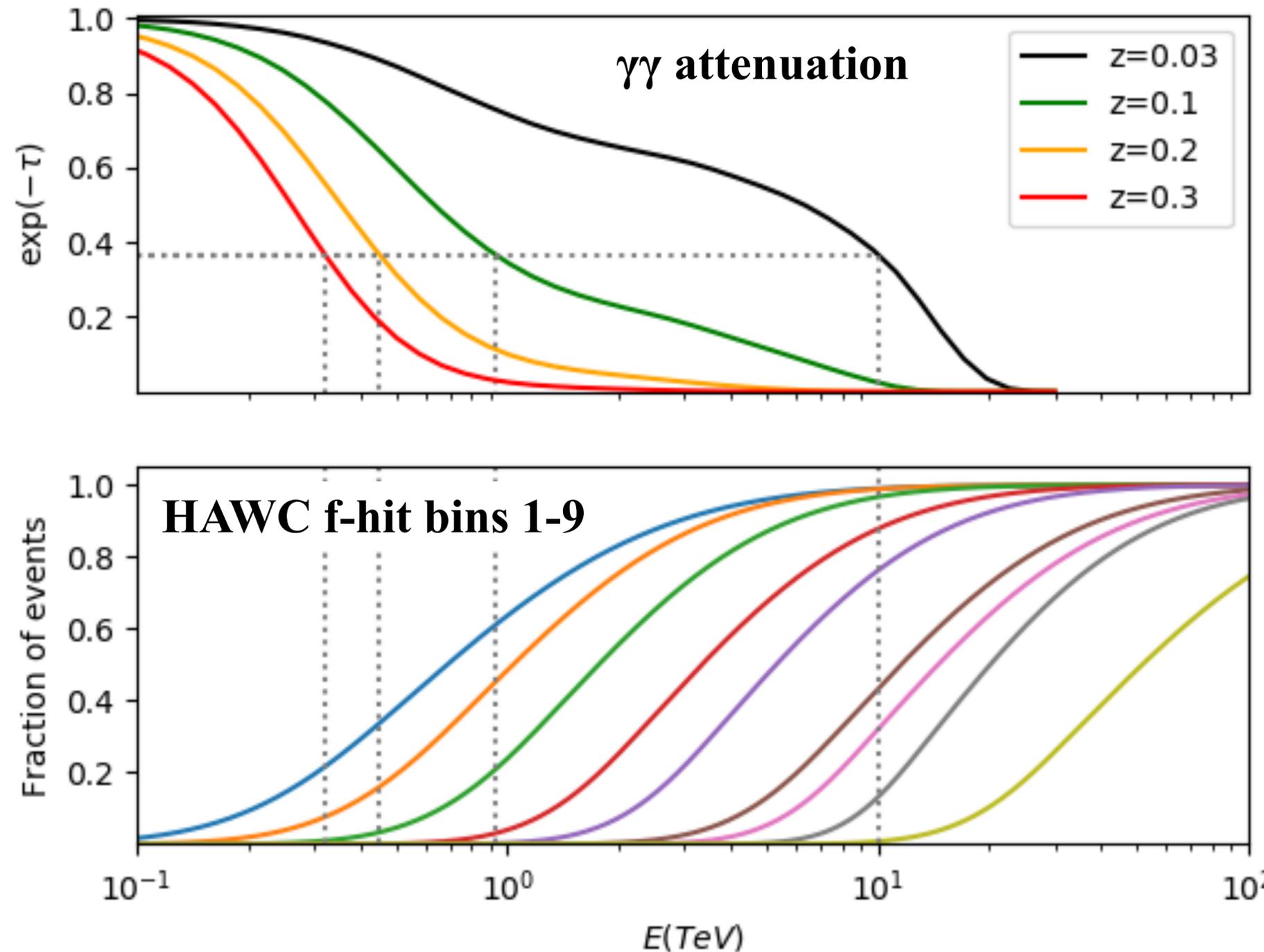
Atenuación fotón - fotón por el EBL

- Rayos γ de alta energía interactúan con luz IR + óptica + UV (la EBL).
- $\gamma\gamma \rightarrow e^-e^+$ es óptimo poco después del umbral:

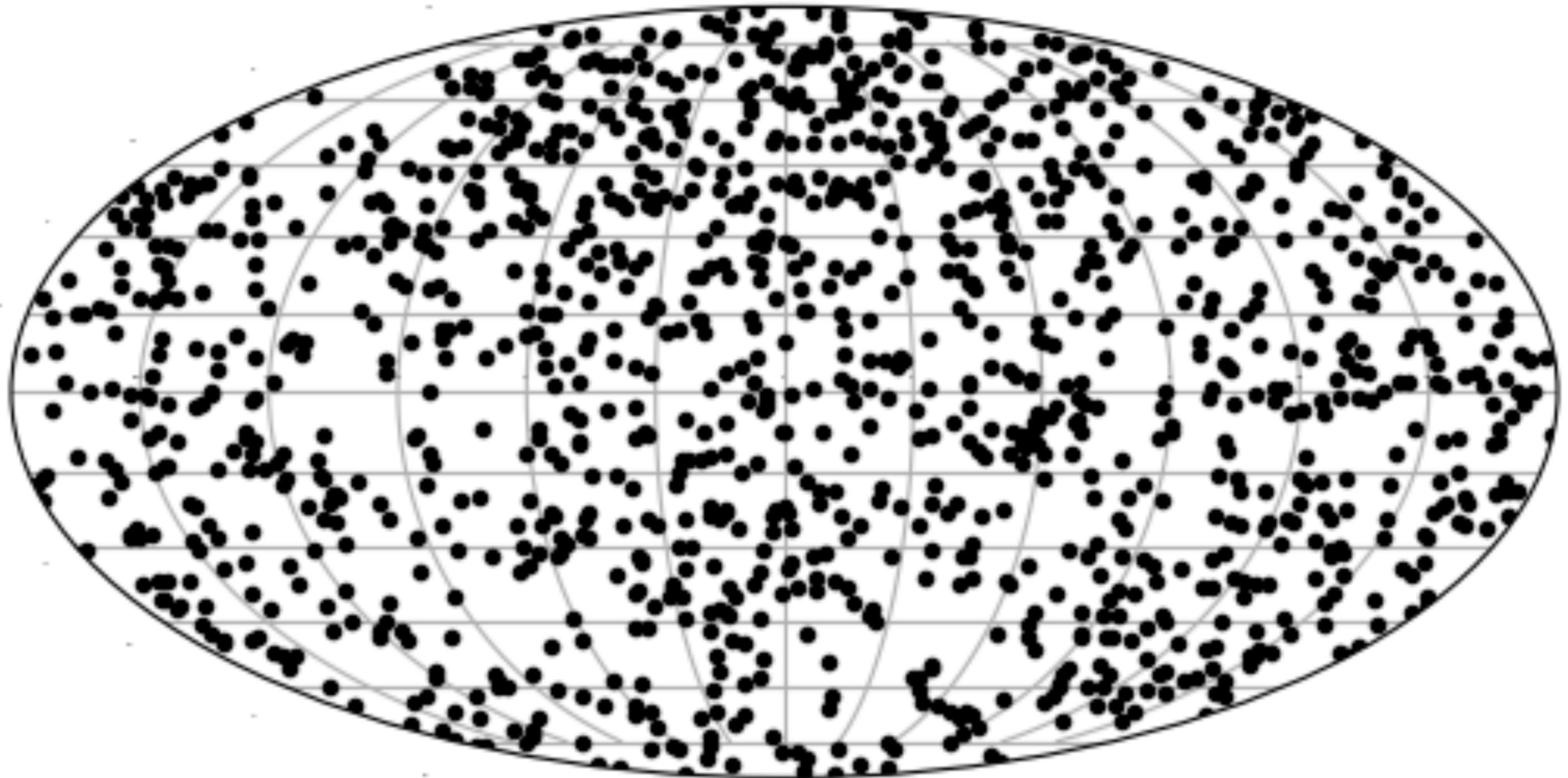
$$E_\gamma h\nu \gtrsim 0.25 \text{ TeV}\cdot\text{eV}$$

$$\lambda \approx 4.8 \text{ }\mu\text{m} (E_\gamma/\text{TeV})$$

- Se calcula la opacidad del Universo a los rayos γ , $\tau(E_\gamma, z)$, con modelos del fondo de luz extragaláctica (EBL), $n_\nu(z)$, entre el UV y el FIR.

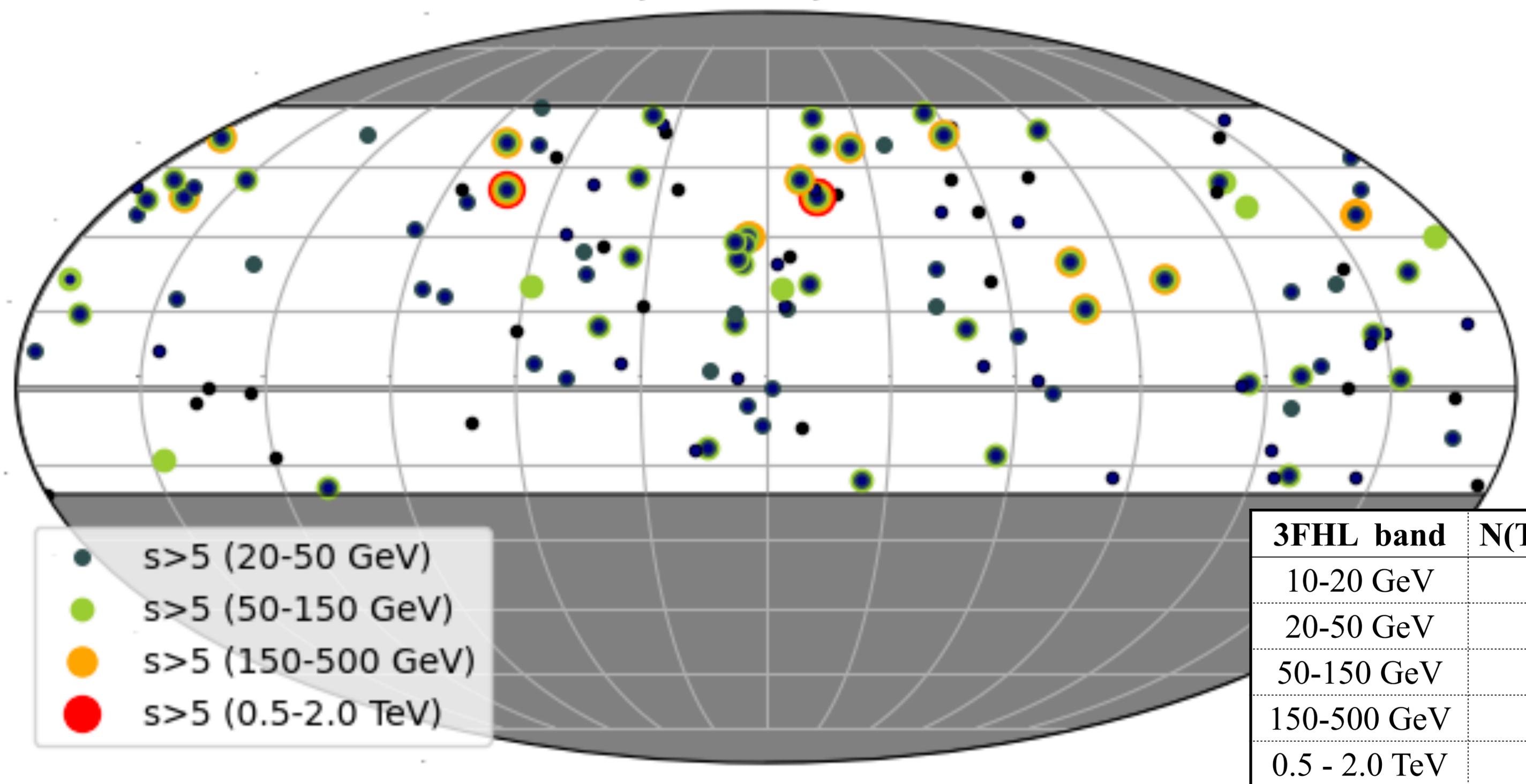


3FHL AGN: all

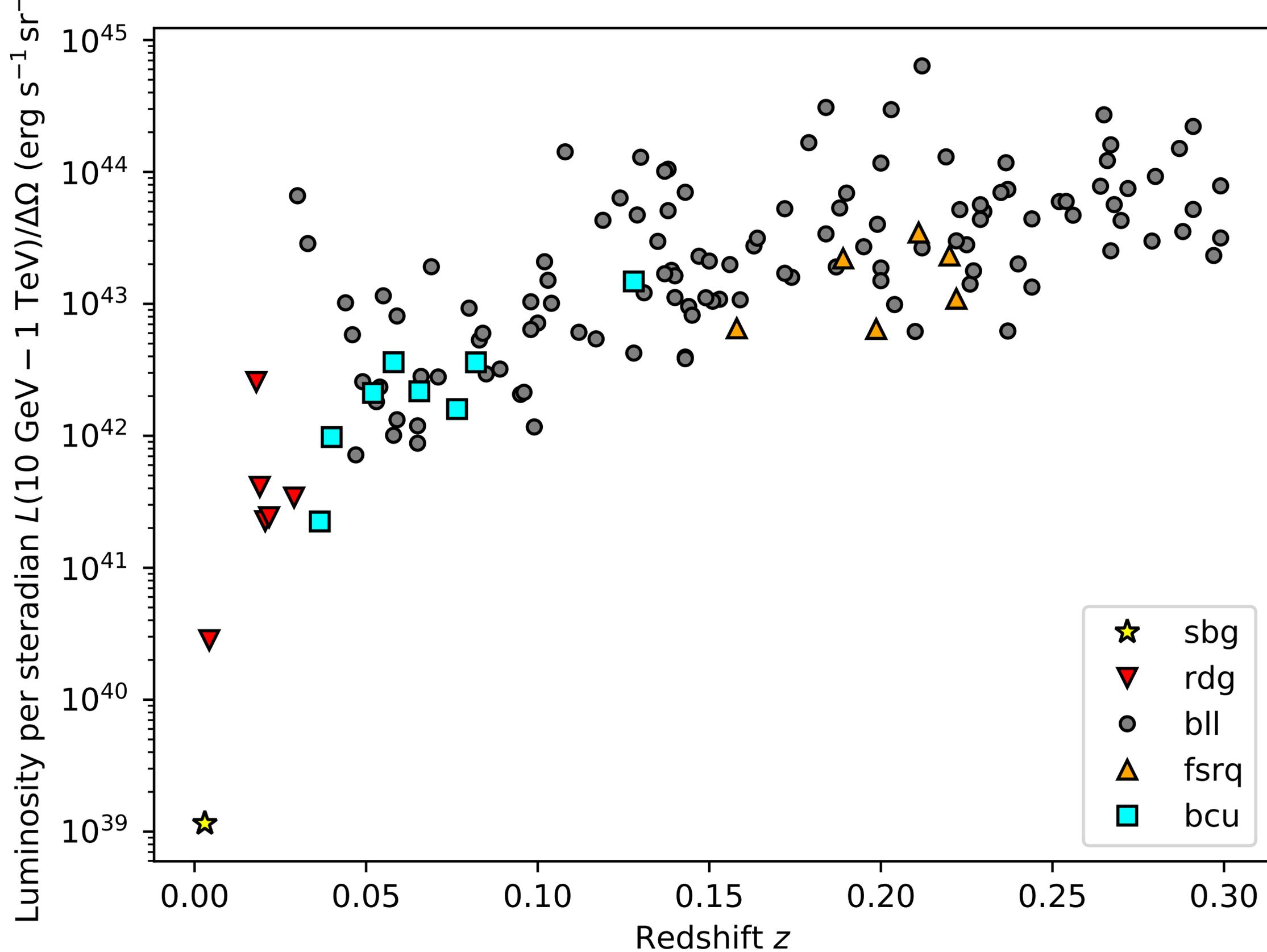


1231 AGN in 3FHL

3FHL AGNs: $|\delta - 19^\circ| < 40^\circ$ & $z < 0.3$



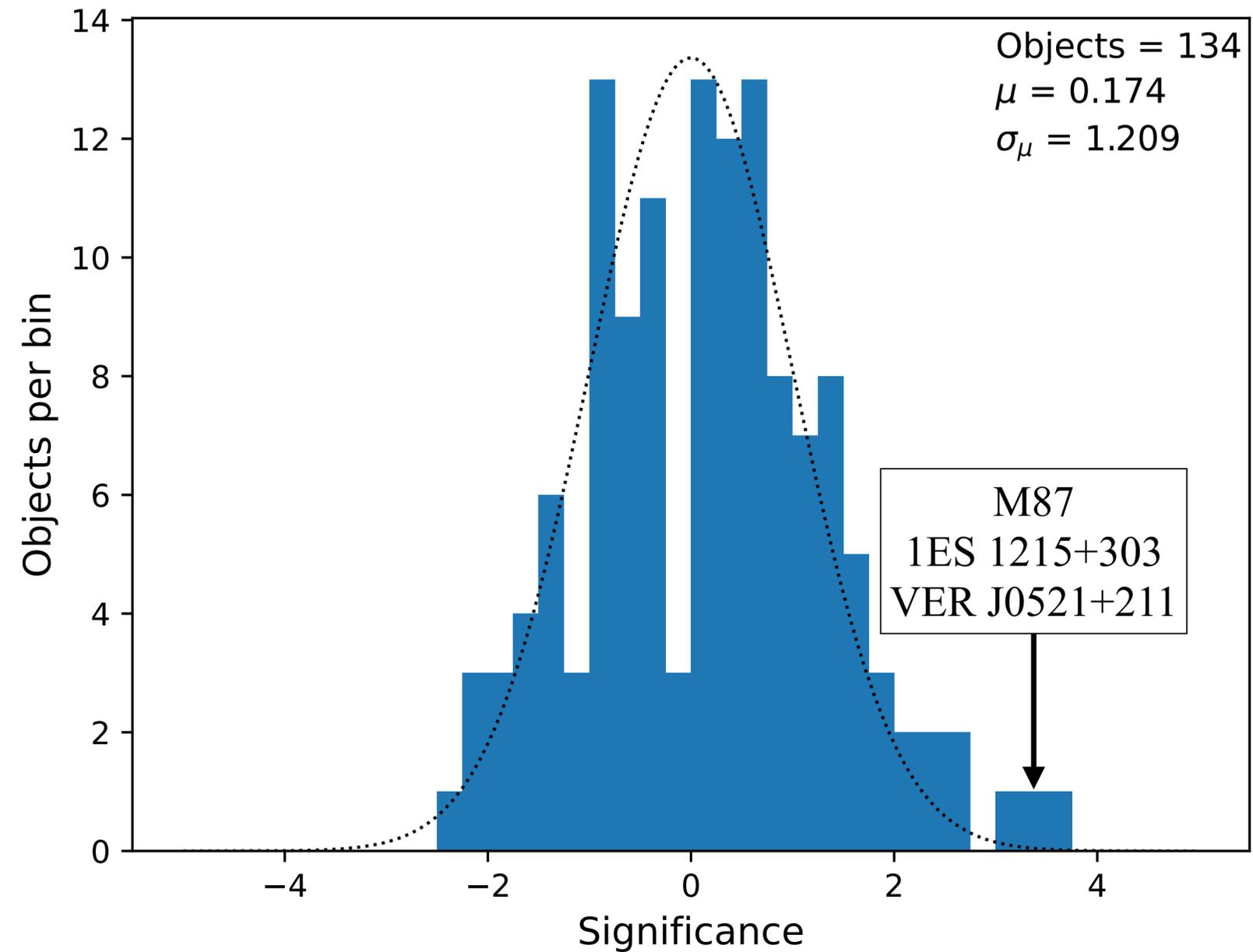
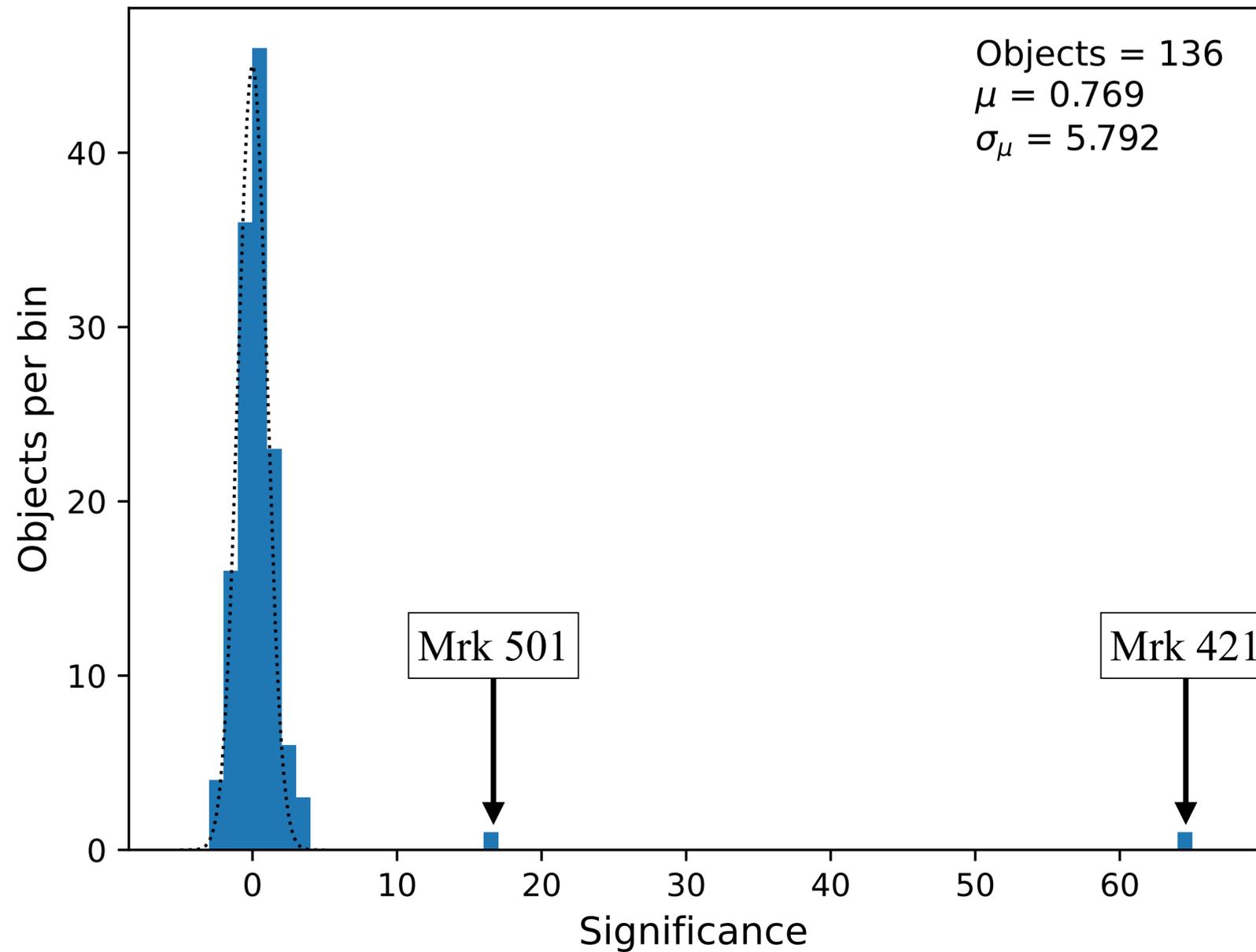
138 AGN in 3FHL & HAWC FoV & $z < 0.3$



- Muestra de AGNs**
- 1 galaxia starburst (NGC 1068)
 - 6 radiogalaxias (M87, IC 310, ...)
 - 117 objetos BL Lac
 - 6 Flat Spectrum Radio Quasars
 - 8 blazars of uncertain class (bcu)

Albert et al. (2021; ApJ 907, 67)

HAWC AGN survey



Albert et al. (2021; ApJ 907, 67)

Resumen y novedades

- El observatorio HAWC ha operado exitosamente por más de cinco años (& pandemia), generando una base de datos de 1523 días efectivos y produciendo el 3HWC y el survey de AGNs.
- El Plano Galáctico está dominado por PWNe, TeV halos y SNRs.
 - & Cygnus, incluido el Cocoon (formación estelar; Nat Astron - marzo 2021).
- Fuentes por encima de 100 TeV (200 TeV! - ApJ 907), indicando probables aceleradores hadrónicos.
 - Búsqueda de coincidencias con IceCube sobre el Plano Galáctico; en proceso.
- Fuentes extragalácticas (AGNs) más difíciles de observar en TeV; hasta $z \approx 0.3$.
 - multiplane fitter en pass 5 \Rightarrow mejora a la respuesta sub-TeV.

HAWC outriggers

El detector central de HAWC ha sido rodeado por pequeños WCDs periféricos (2m²).



Área total: 100,000 m².
Mayor respuesta a energías
por encima de 10 TeV.

Inicio / Twitter Comedy Wildlife... The weird space... Formas de aport... WhatsApp Día de Cataluña -... allskyC_0.0_milag... Outlook Datasets

HAWC
High Altitude Water Cherenkov

HAWC Observatory Publications **Public Datasets** Resources

- **Intro**
- 3HWC Survey
- 2HWC Survey Interactive Tool
- Geminga Paper
- IC170922 neutrino followup
- Lightcurves
- SS-433
- Crab Dataset

Public Datasets

HAWC is a wide-field detector with an instantaneous field-of-view of nearly 2 sr and a daily exposure of more than 8 sr of the sky. HAWC is uniquely suited, in the multi-TeV band, for all-sky survey and detection of transients. One of the core goals of HAWC is public release of data to facilitate multi-wavelength, multi-messenger follow-up by other instruments.

Other Data

Making the full HAWC dataset available is prohibitive. Analysis requires dedicated computing infrastructure and custom tools. Nevertheless, specific analyses of specific events or sky locations may be done with help from a member of the HAWC team. If the data you are interested in is not included in one of the public datasets, you can contact one of the relevant leaders of the HAWC working groups below who can facilitate your analysis.

- Science Coordinator: [Andrea Albert](#)
- Galactic Coordinator: [Kelly Malone](#)
- Extra-galactic Astrophysics: [Hugo Ayala](#)
- Particle Physics: [Mehr Un Nisa](#)
- Cosmic-Ray Physics: [Juan Carlos Arteaga](#)

For any questions or comments, you can find our contact on our [collaboration page](#).

(c) 2017-2020 HAWC Collaboration. All rights reserved.



www.hawc-observatory.org