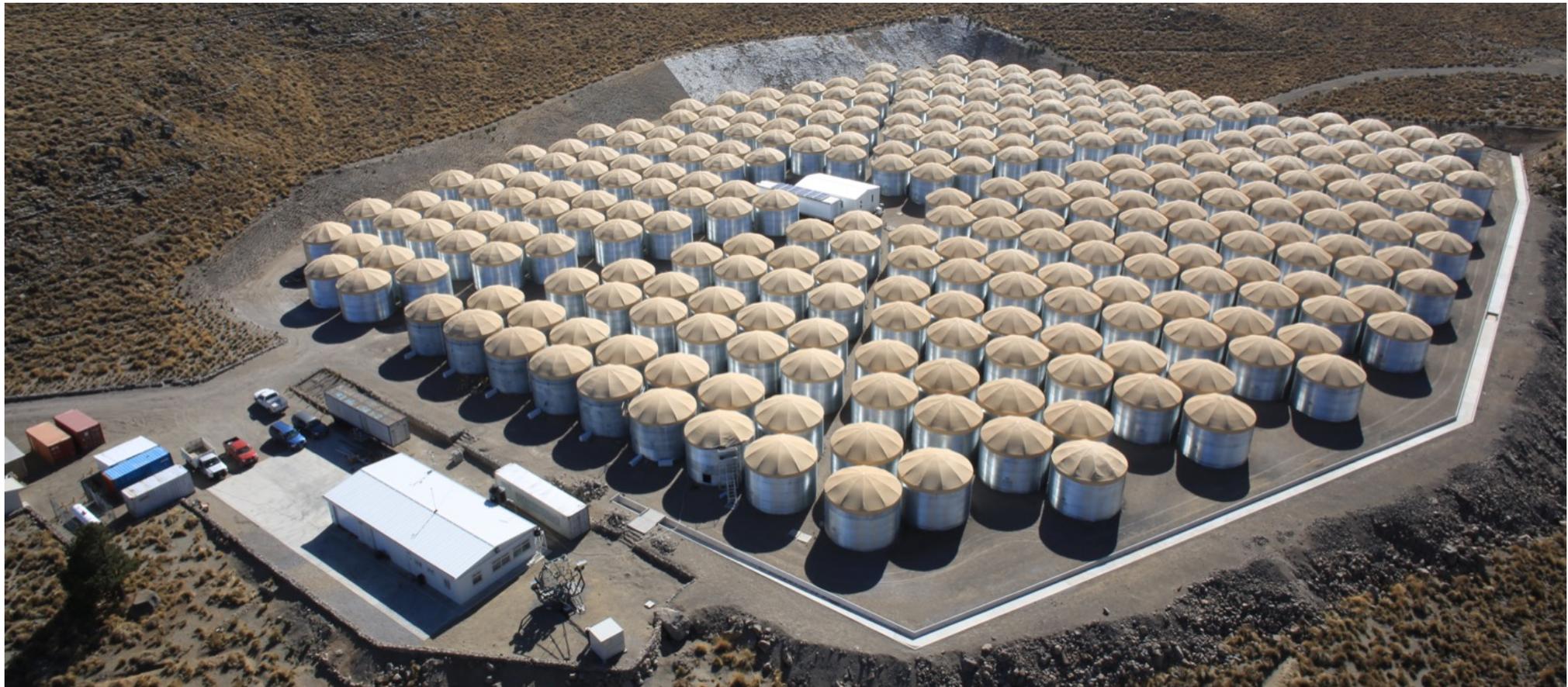


Resultados recientes en física de rayos cósmicos con el observatorio HAWC



Hermes León Vargas
Instituto de Física, UNAM

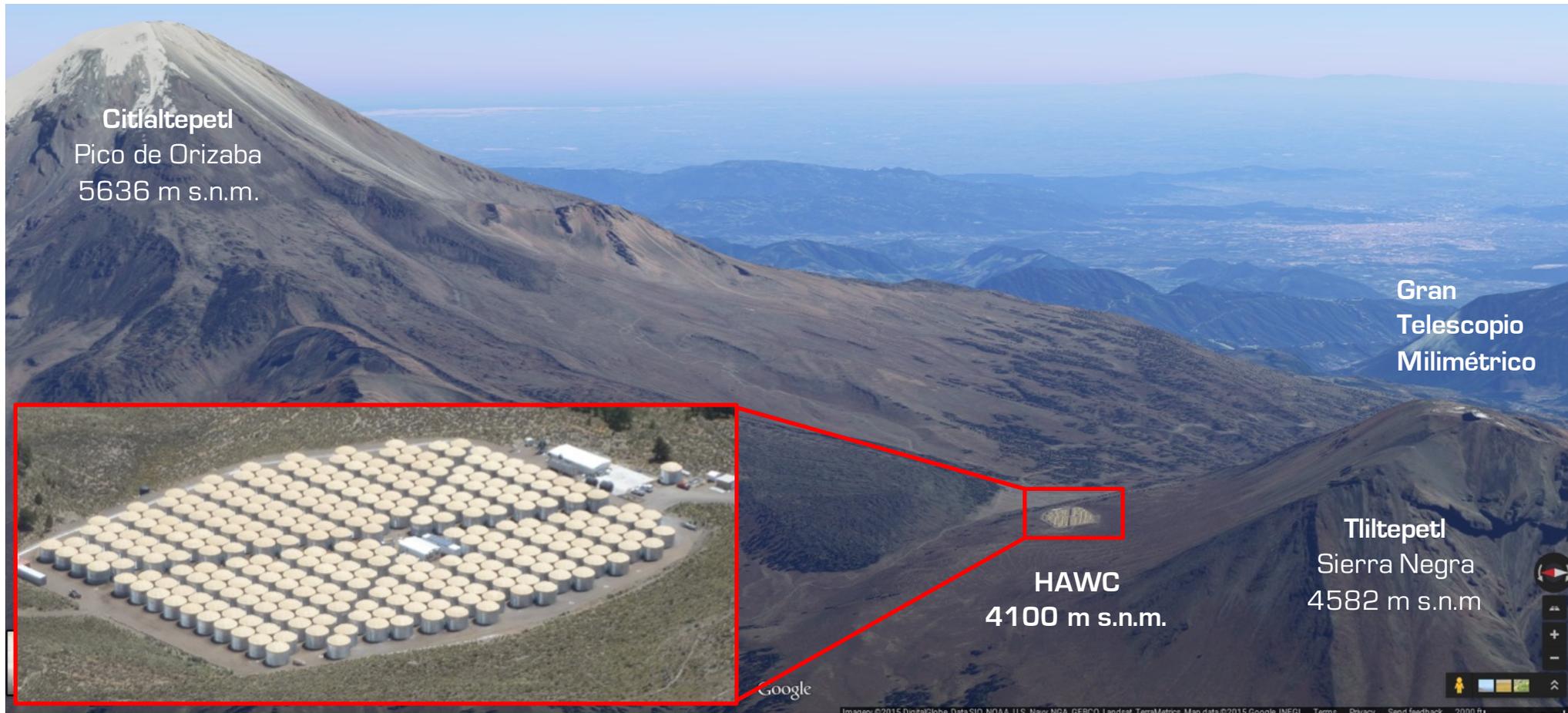
Reunión de la División de Rayos Cósmicos, SMF
Puebla, Puebla
4 de octubre de 2018

Otros resultados de HAWC en esta reunión

Otras charlas (hoy)

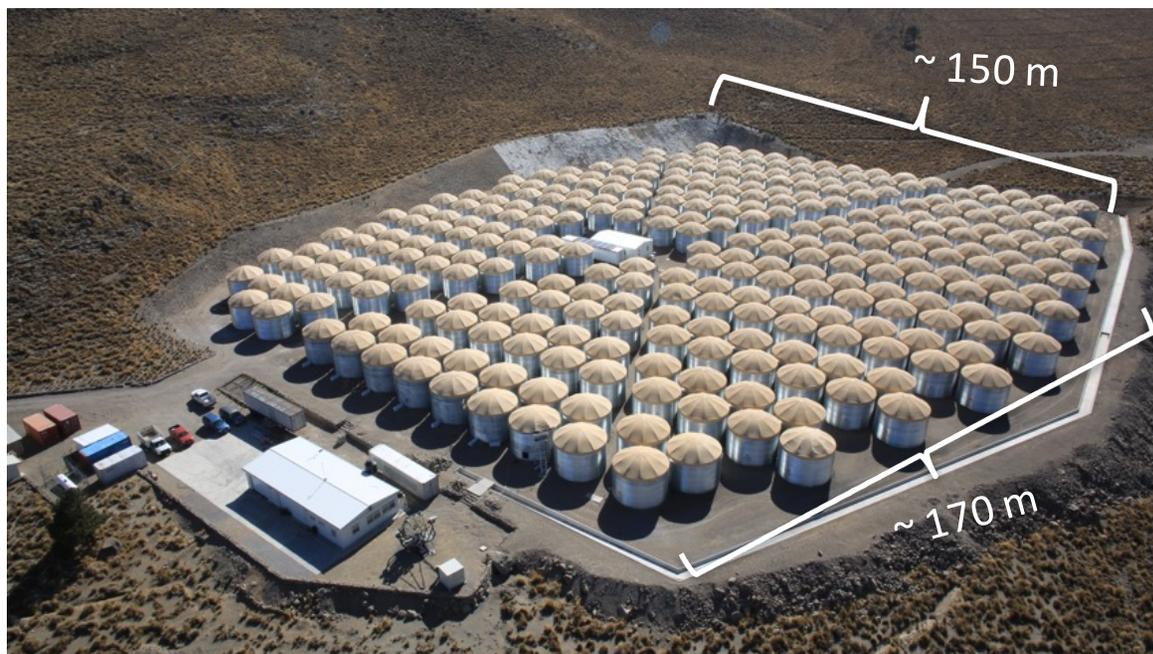
- **The use of neural networks for gamma/hadron separation with HAWC**
14:00. Tomás Capistrán Rojas
- **The Light-Component of the Cosmic Ray Spectrum measured with HAWC**
14:30. Juan Carlos Arteaga Velázquez
- **Estimación del parámetro de edad a partir del estudio de la distribución lateral de carga depositada utilizando el observatorio HAWC**
15:30. Jorge Antonio Morales Soto
- **Método preliminar de análisis de composición de rayos cósmicos**
16:00 Juan de Dios Alvarez

¿En dónde se encuentra HAWC?



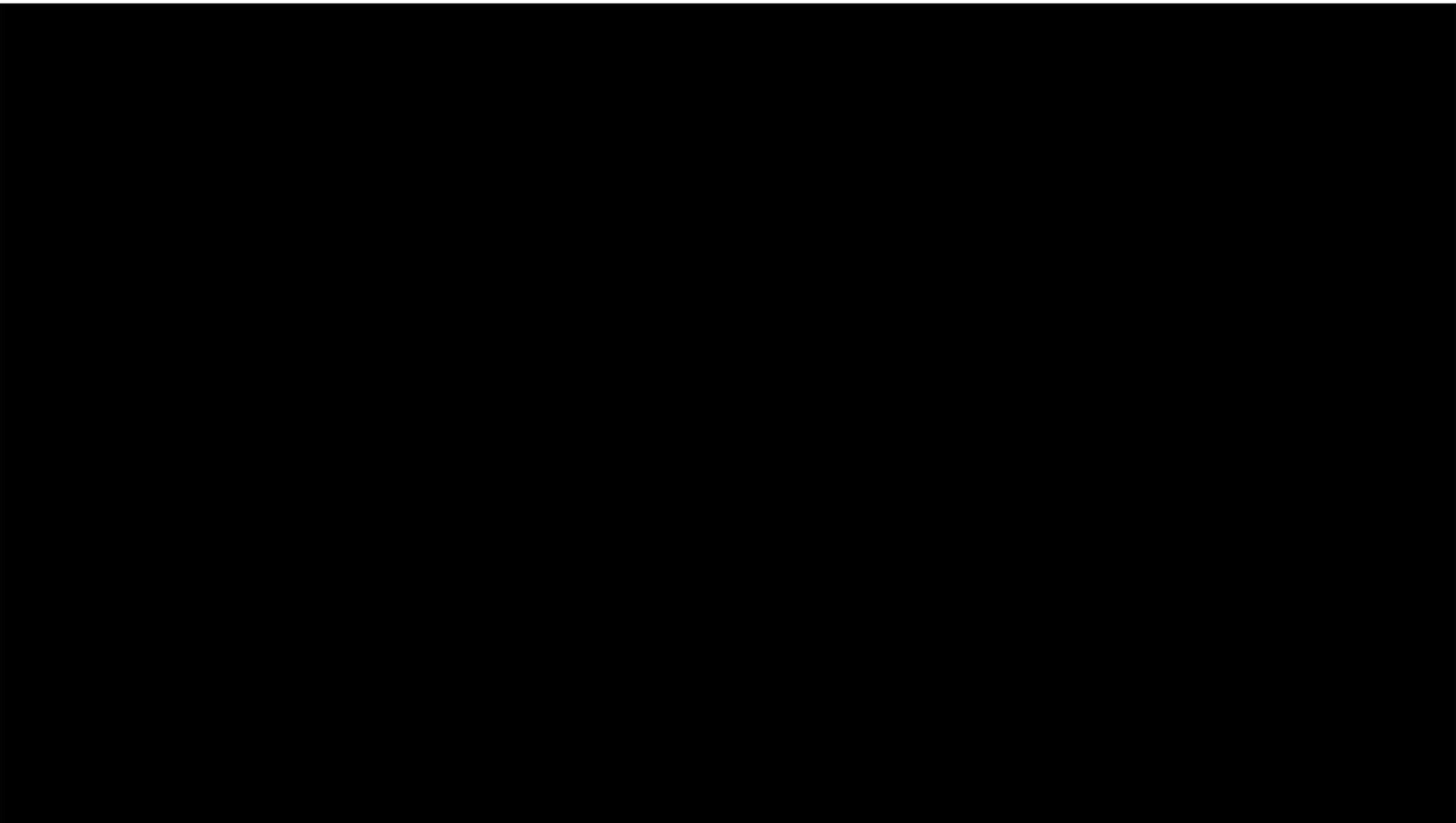
HAWC: detectando rayos gamma en México

Primer instrumento de frontera en física de altas energías instalado en México



2012 - 2014

HAWC





USA



Mexico

La colaboración HAWC



Estados Unidos:

Pennsylvania State University
University of Maryland
Los Alamos National Laboratory
University of Wisconsin
University of Utah
Univ. of California, Irvine
University of New Hampshire

University of New Mexico
Michigan Technological University
NASA/Goddard Space Flight Center
Georgia Institute of Technology
Colorado State University
Michigan State University
University of Rochester
University of California Santa Cruz

Polonia:

IFJ-PAN, Cracovia

Alemania:

Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg

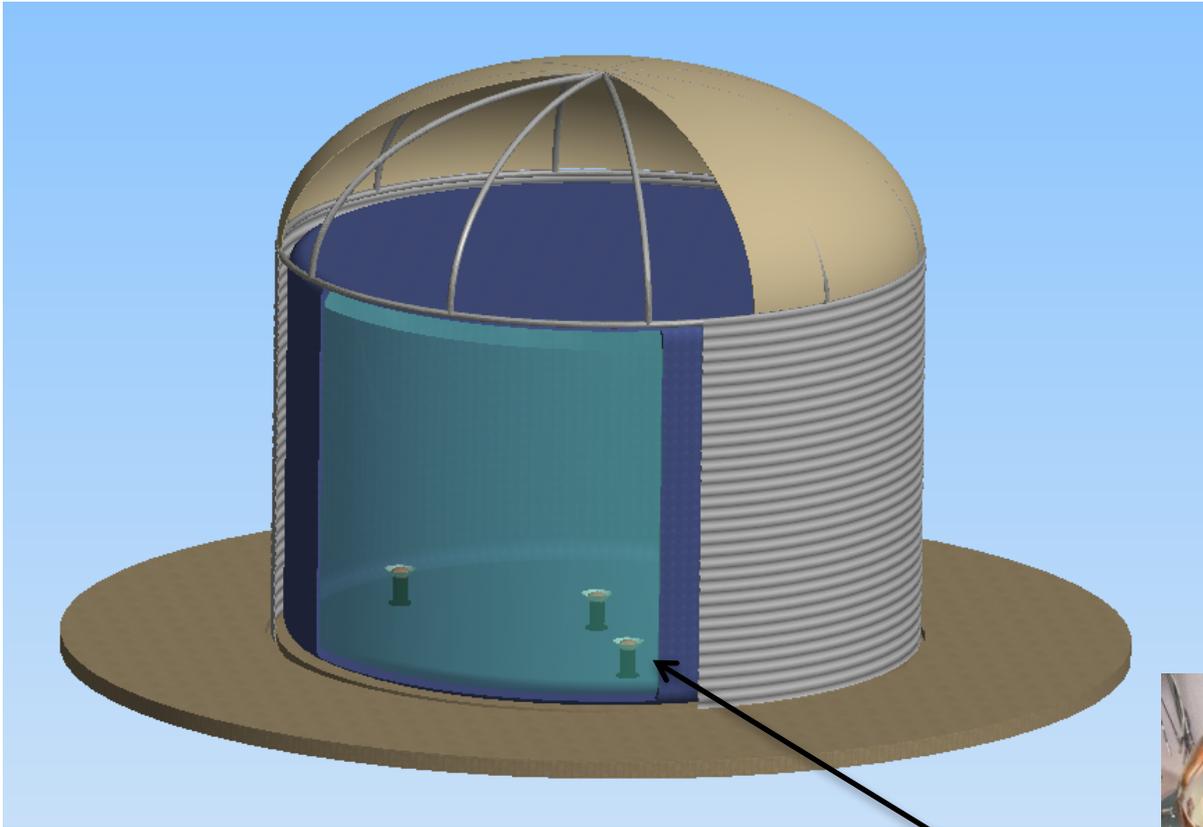
México:

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Instituto de Física
Instituto de Astronomía
Instituto de Geofísica
Instituto de Ciencias Nucleares
Universidad Politécnica de Pachuca
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Universidad Autónoma de Chiapas
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Universidad de Guadalajara

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
Instituto Politécnico Nacional
Centro de Investigación en Computación - IPN



Los detectores de HAWC



- 300 tanques de agua
 - Diámetro: 7.3 m
 - Altura: 5 m
 - Volumen de agua: 200,000 litros
 - 4 sensores de luz



Tubos
Fotomultiplicadores:

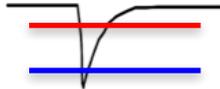
Detectan y amplifican
la señal producida
por la luz

Adquisición de datos

HAWC Collaboration
Nucl. Instrum. Meth. A 888 (2018) 138-46



Tubo fotomultiplicador



Front-End Electronics



CAEN Vx1190
Time-to-Digital
Converters

- El sistema se basa en medir el ToT (*Time over Threshold*)
- HAWC utiliza los TDCs para grabar de manera continua el paso por los umbrales : el experimento adquiere y transmite todas las señales digitales de los TDCs a un pequeño *cluster* de computadoras
- El *trigger* se hace con *software*: multiplicidad de PMTs con señal

El agua en HAWC

Agua ultra pura especialmente tratada con una planta instalada en el laboratorio HAWC



El agua en HAWC

Agua ultra pura especialmente tratada con una planta instalada en el laboratorio HAWC



¡El volumen de agua en HAWC es suficiente para dar una botella de agua a cada ciudadano mexicano!



× 120 millones

El agua en HAWC

Agua ultra pura especialmente tratada con una planta instalada en el laboratorio HAWC

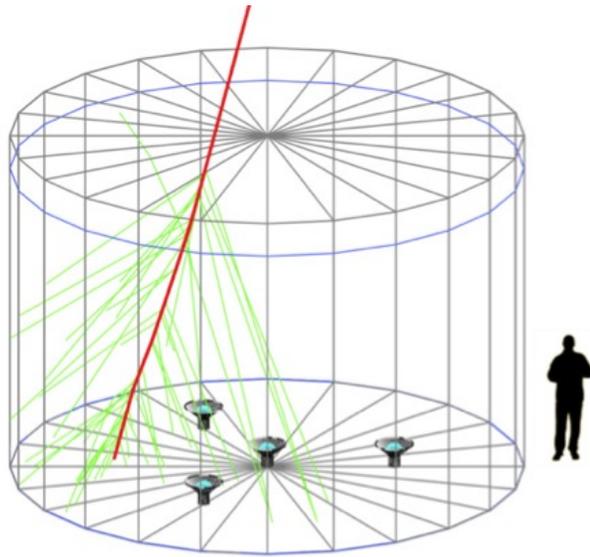


¡El volumen de agua en HAWC pesa tanto como 110 aviones 747 totalmente cargados!



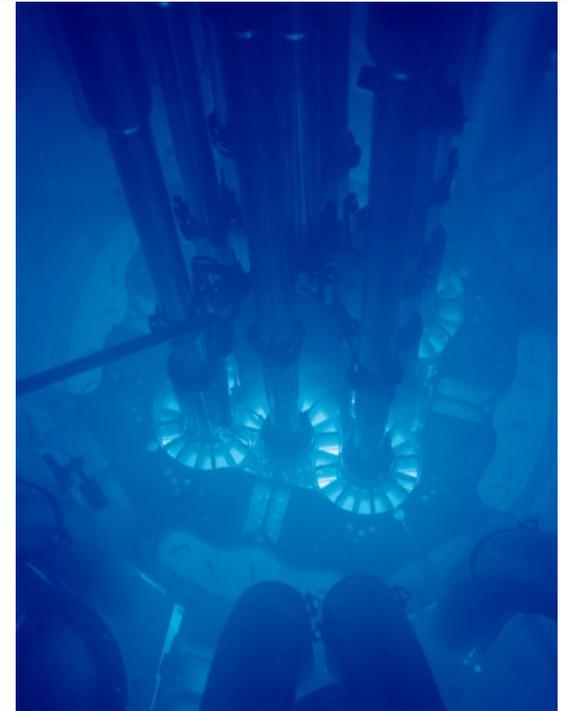
× 110

Luz de Cherenkov



Luz producida en un tanque de HAWC

Cuando una partícula cargada se mueve en un medio transparente más rápido que la velocidad de la luz en el medio produce luz de Cherenkov.

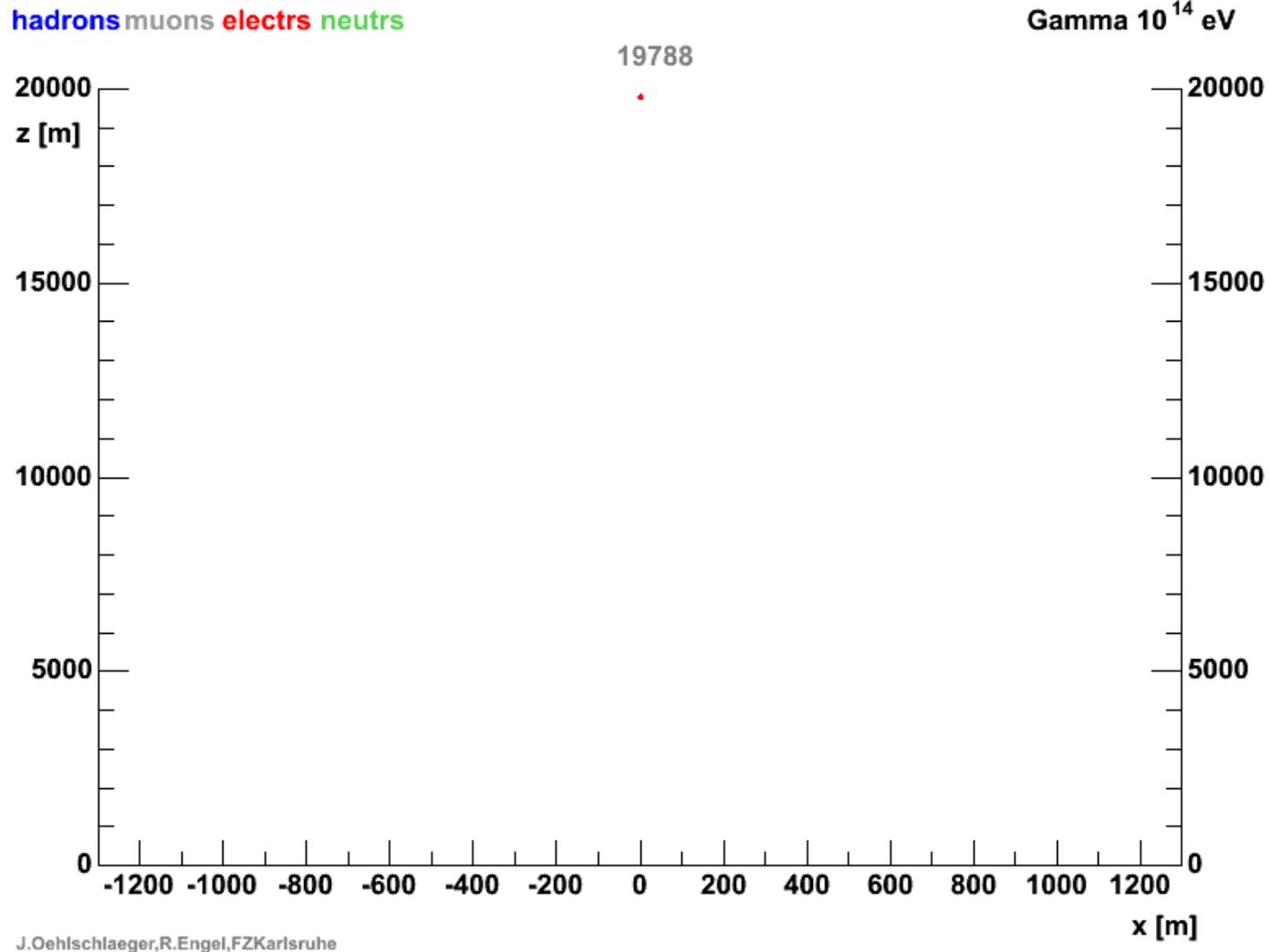


Reactor nuclear

El descubrimiento e interpretación de este efecto mereció el premio Nobel de 1958.

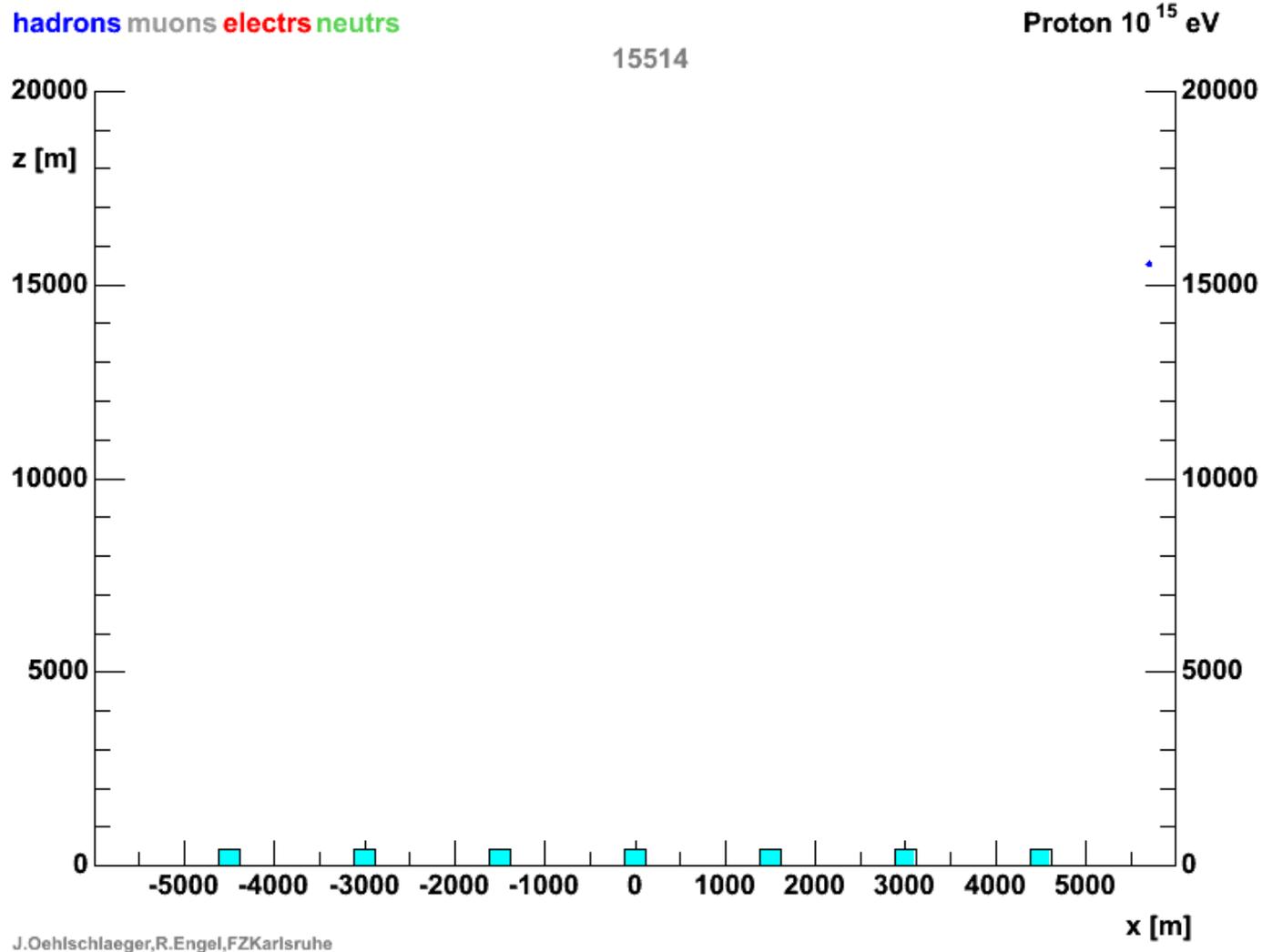
Lo que medimos es la luz Cherenkov producida por las partículas que atraviesan a los tanques de HAWC.

Cascadas atmosféricas



Institute für Kernphysik
Forschungszentrum Karlsruhe

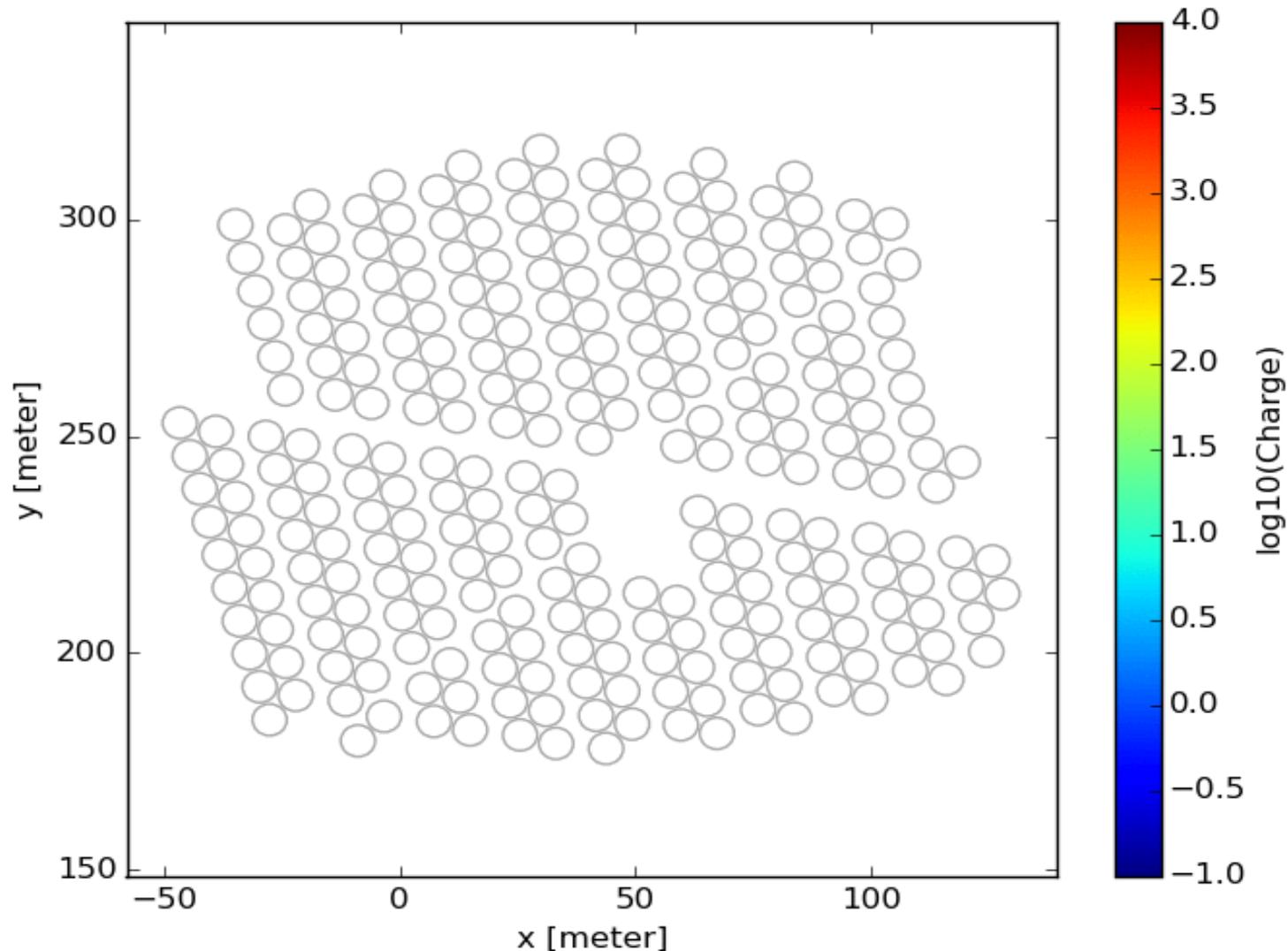
Cascadas atmosféricas



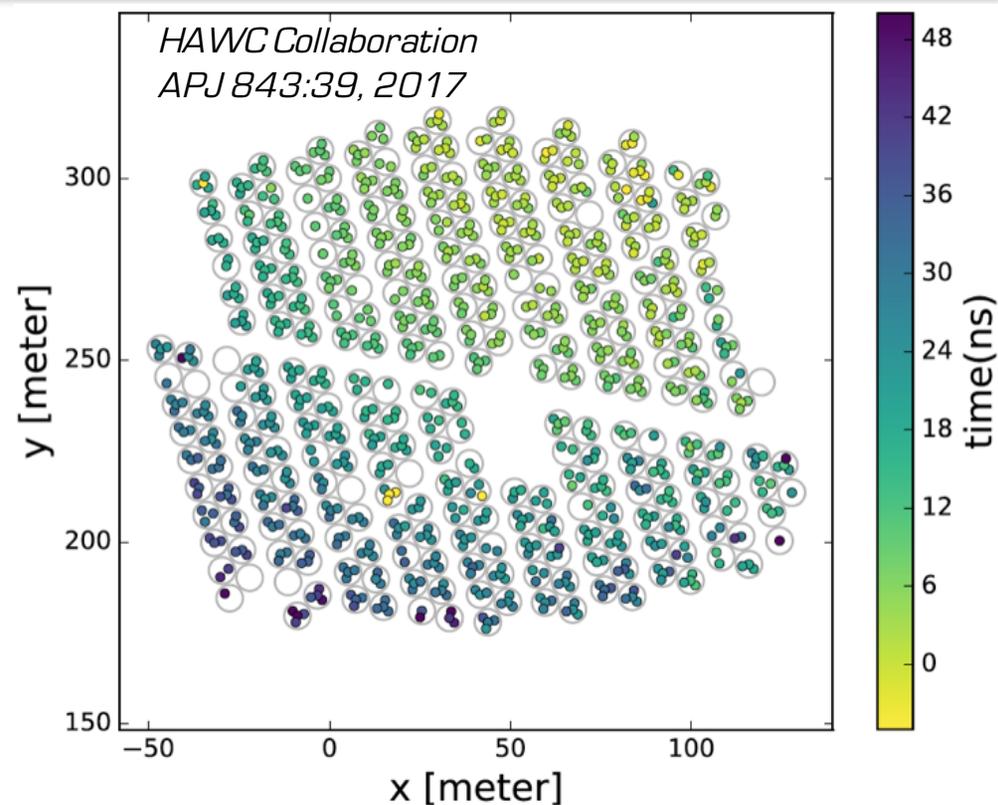
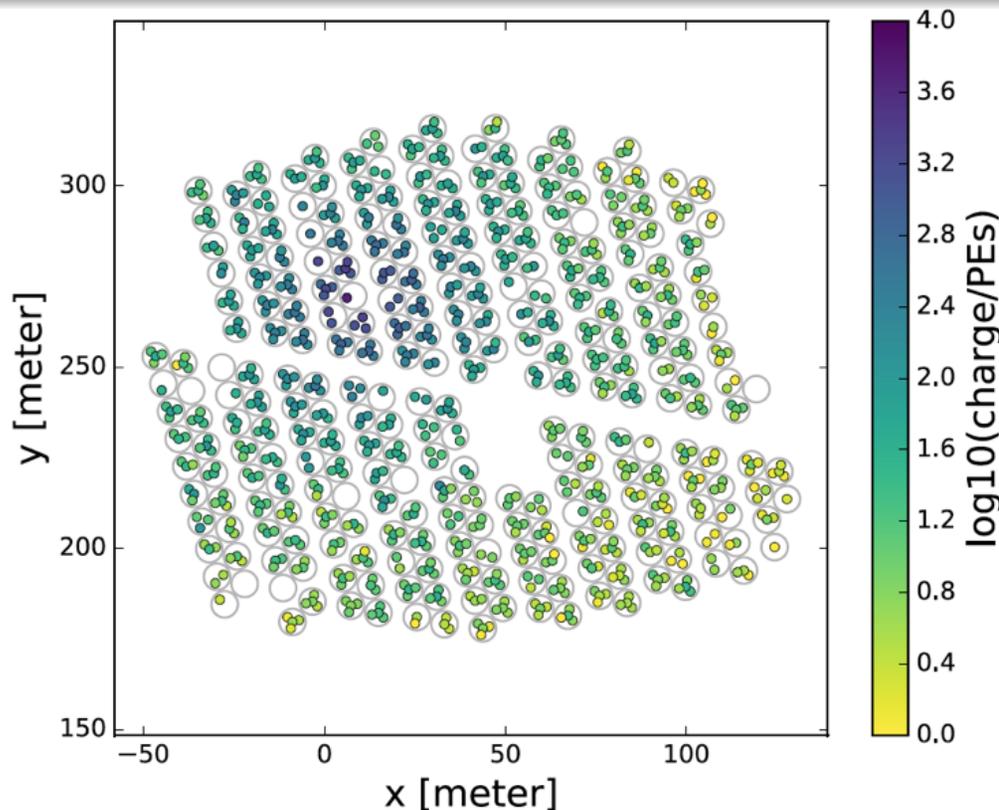
Institute für Kernphysik
Forschungszentrum Karlsruhe

Cascada atmosférica vista por HAWC

Esta cascada tarda aproximadamente 100 nano segundos en propagarse
¡El video es $\sim 10^7$ veces mas lento que la realidad!



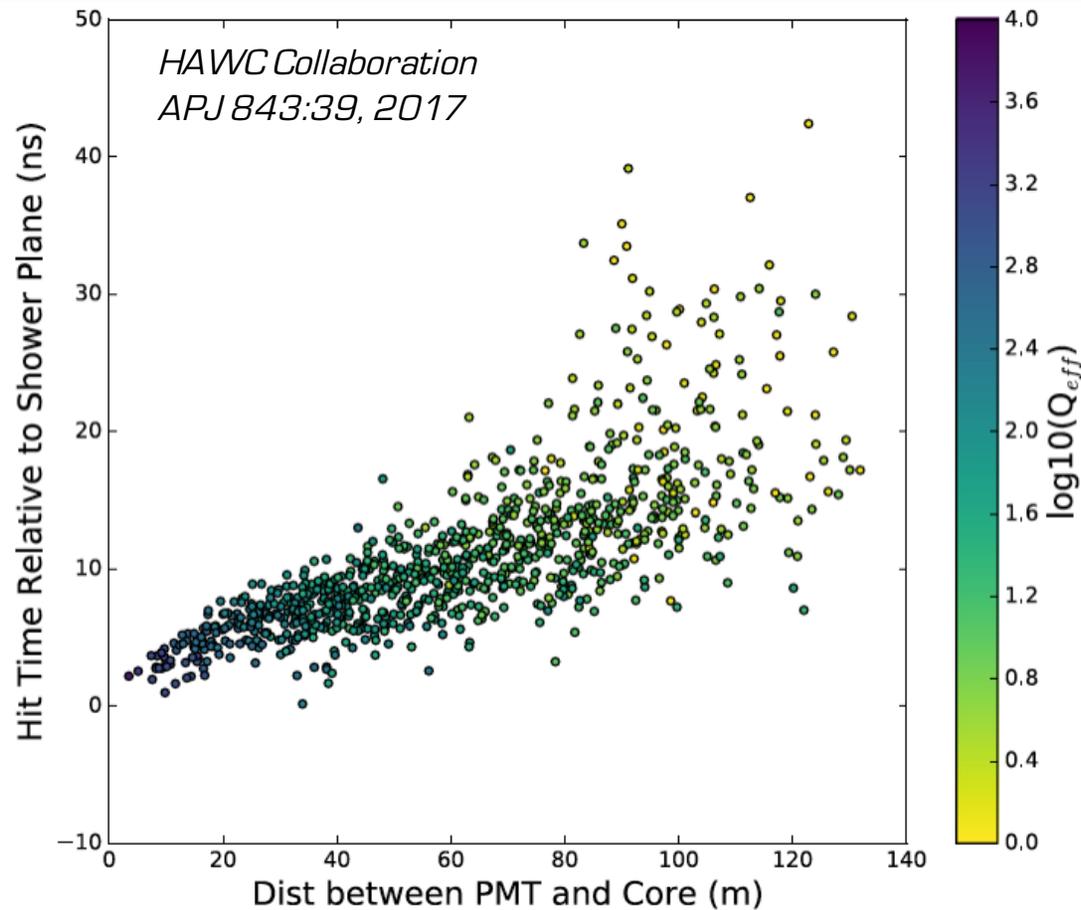
Reconstrucción de cascadas atmosféricas con HAWC



Paso	Descripción	Selección de Hits
1	Calibración	
2	Selección de hits	
3	Reconstrucción del núcleo de la cascada como centro de masas	Hits seleccionados
4	Núcleo con SFCF 1 ^{ra} aproximación	Hits seleccionados
5	Dirección 1 ^{ra} aproximación	Hits seleccionados

Paso	Descripción	Selección de hits
6	SFCF 2 ^a aproximación	SH a 50 ns del 1 ^{er} plano
7	Dirección 2 ^a aproximación	SH a 50 ns del 1 ^{er} plano
8	Compacidad, C	SH a 20 ns del 2 ^o plano
9	PINChess, \mathcal{P}	SH a 20 ns del 2 ^o plano

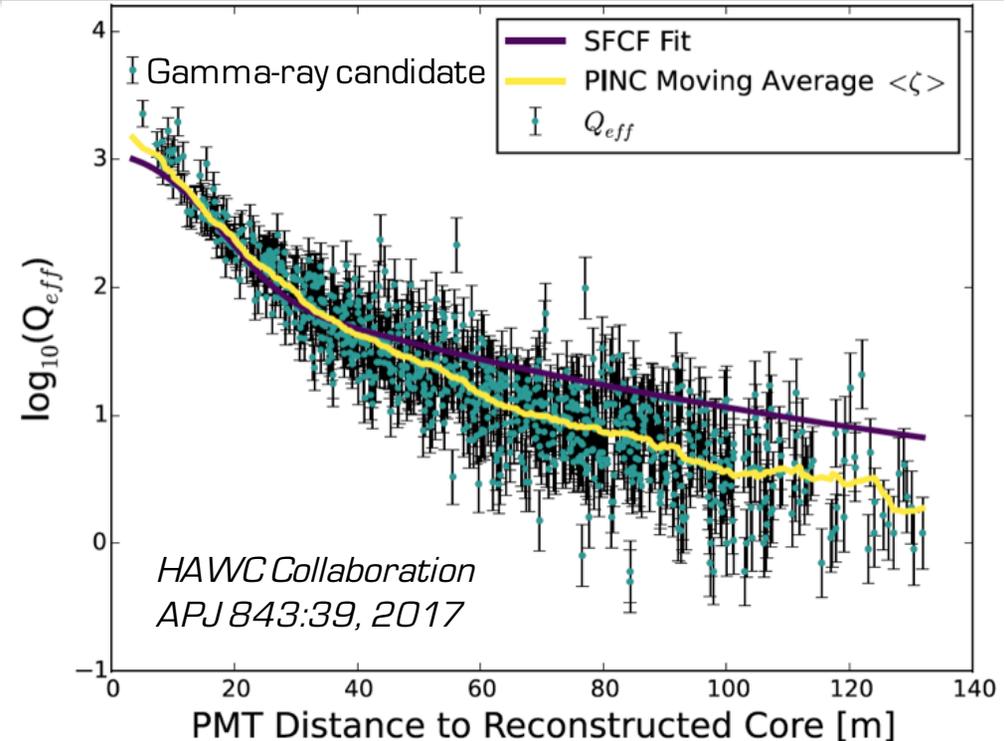
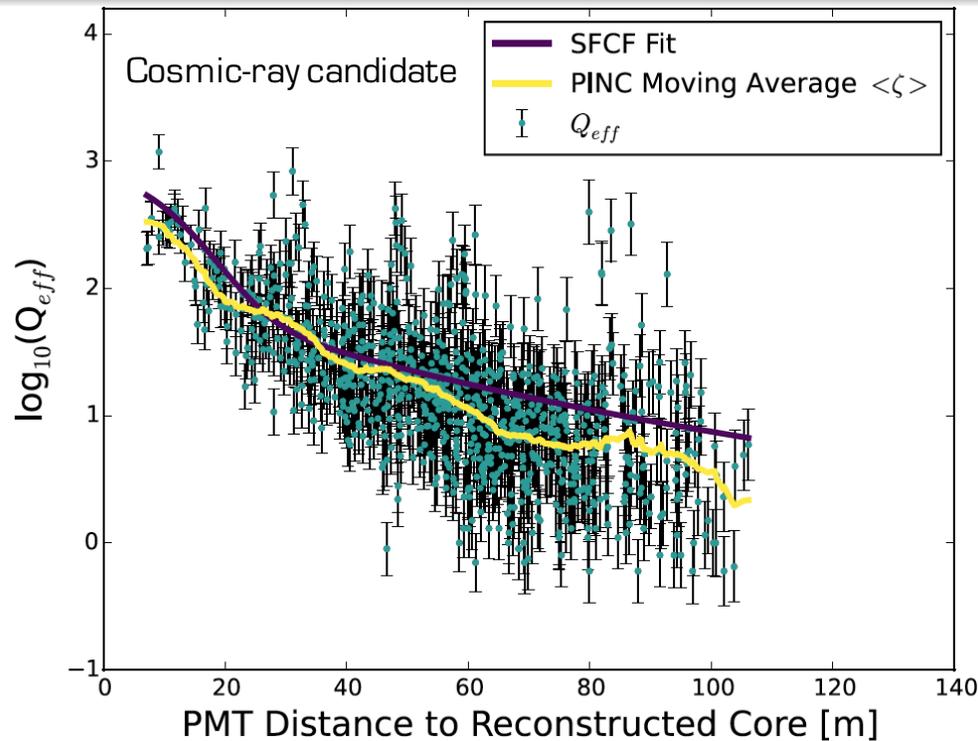
Reconstrucción de cascadas atmosféricas con HAWC



- Distribución de tiempos de llegada de hits para una cascada atmosférica con características consistentes con las de un rayo gamma de la Nebulosa del Cangrejo
- Al considerar la curvatura de la cascada es posible obtener una resolución angular de hasta 0.15°

Separación γ /hadrón

Compacidad C



$CxPE_{40}$: Mayor Q_{eff} fuera de un radio 40 m medido desde el núcleo de la cascada

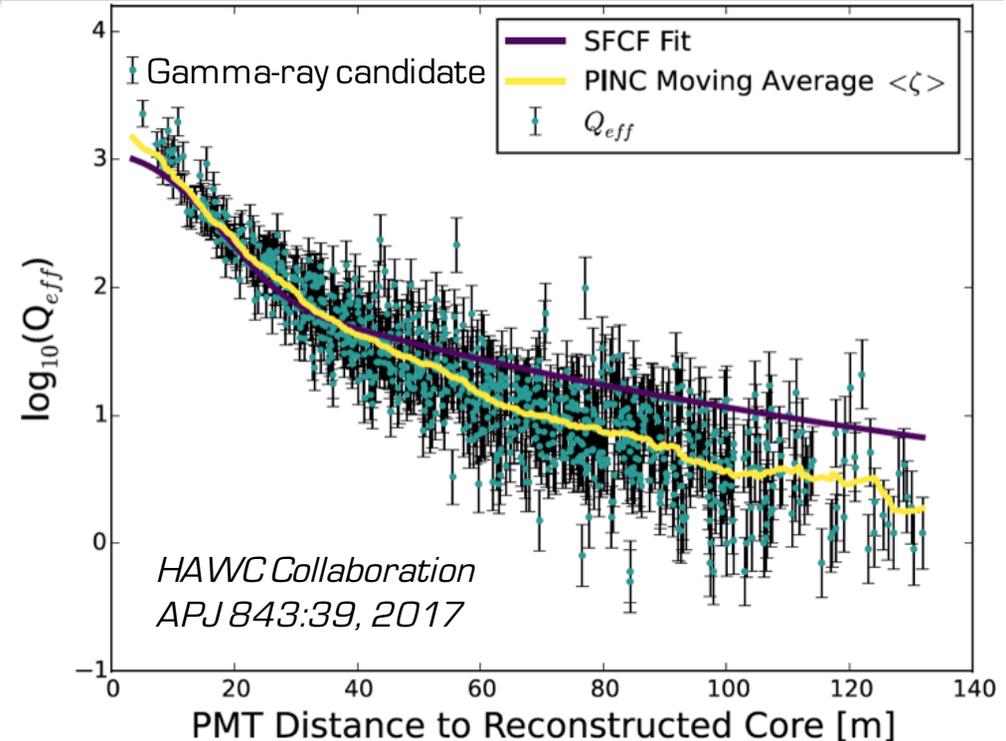
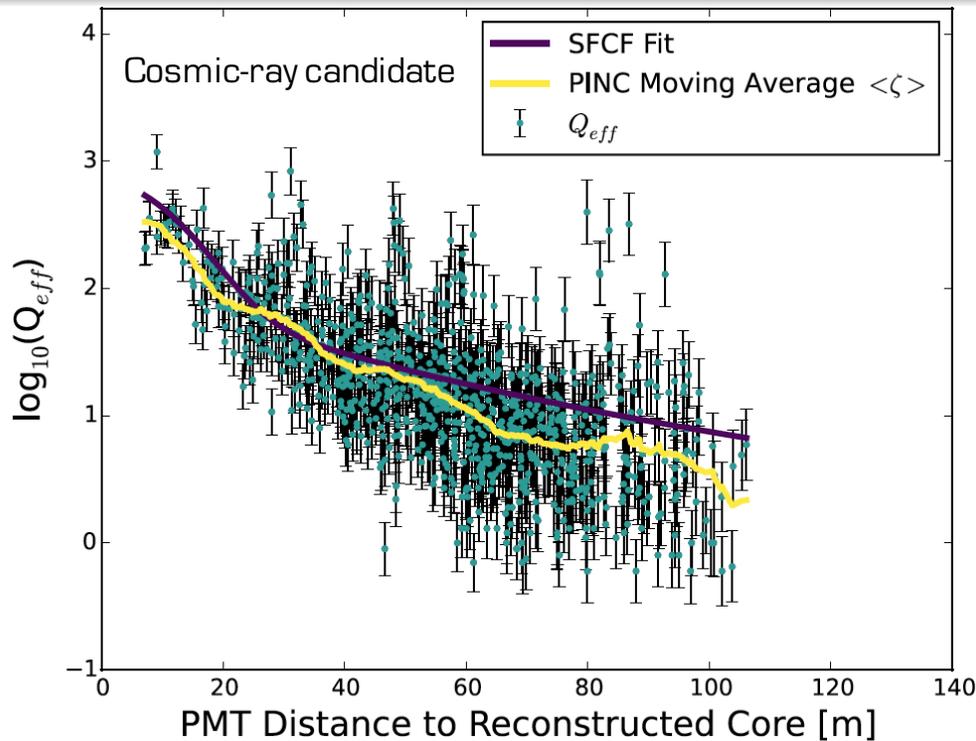
N_{hit} : Número de PMTs con señal en la cascada atmosférica

$$C = \frac{N_{hit}}{CxPE_{40}}$$

Para cascadas hadrónicas el valor de C es pequeño

Separación γ /hadrón

PINCness \mathcal{P}



PINCness (Parameter for Identifying Nuclear Cosmic rays)

$$\mathcal{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \frac{(\zeta_i - \langle \zeta_i \rangle)^2}{\sigma_{\zeta_i}^2}$$

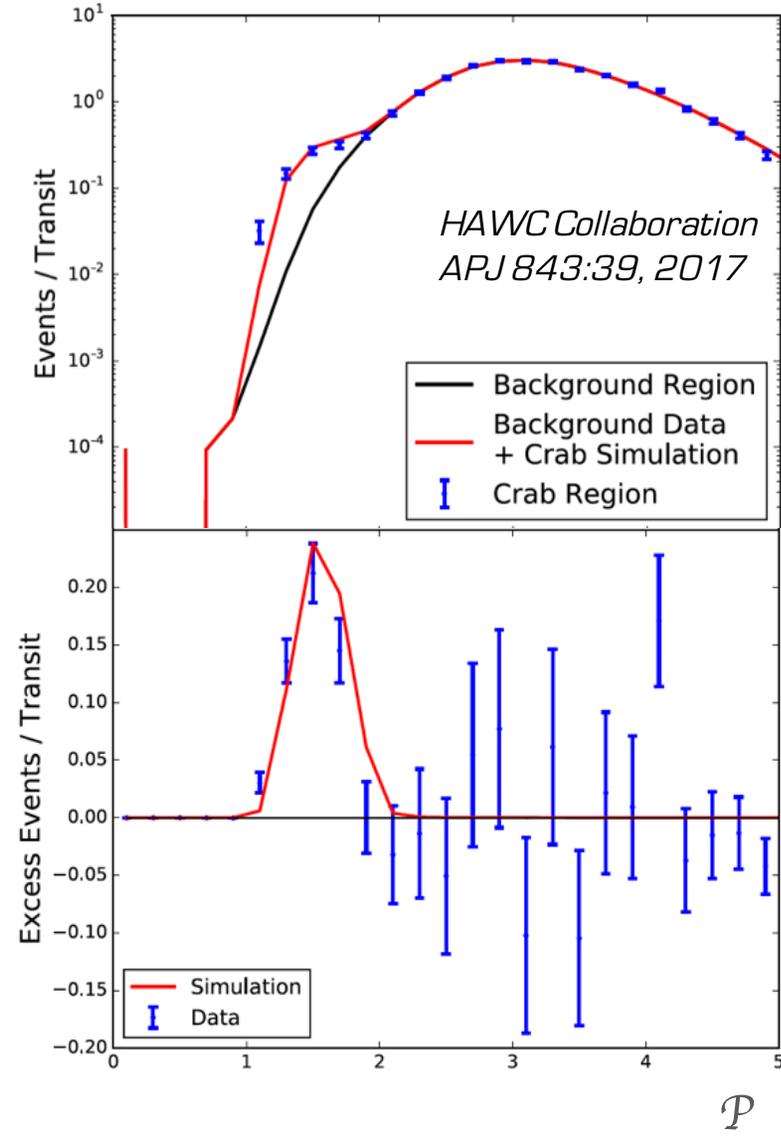
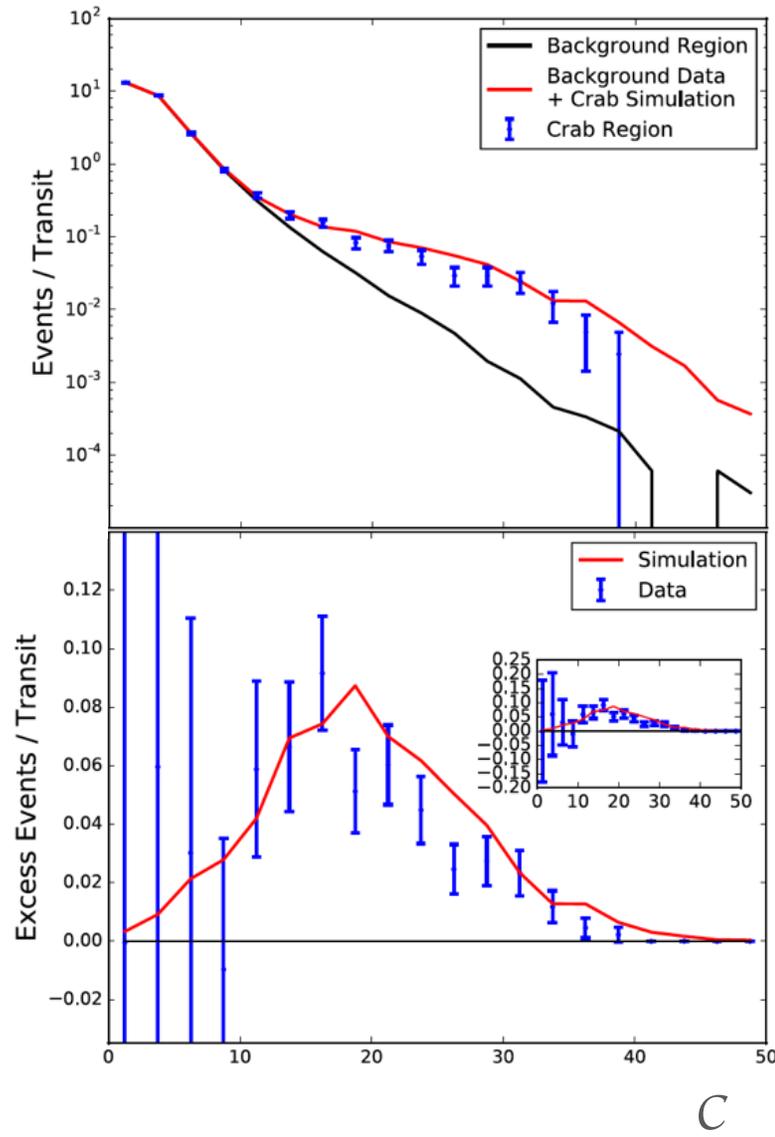
$$\zeta_i = \log_{10}(Q_{eff,i})$$

$\langle \zeta_i \rangle$: Promedio de todos los PMTs en un anillo con ancho de 5m que contiene al PMT con señal

σ_{ζ_i} : A partir de una muestra de señales candidatas a rayos gamma de la Nebulosa del Cangrejo

Para cascadas hadrónicas \mathcal{P} es grande

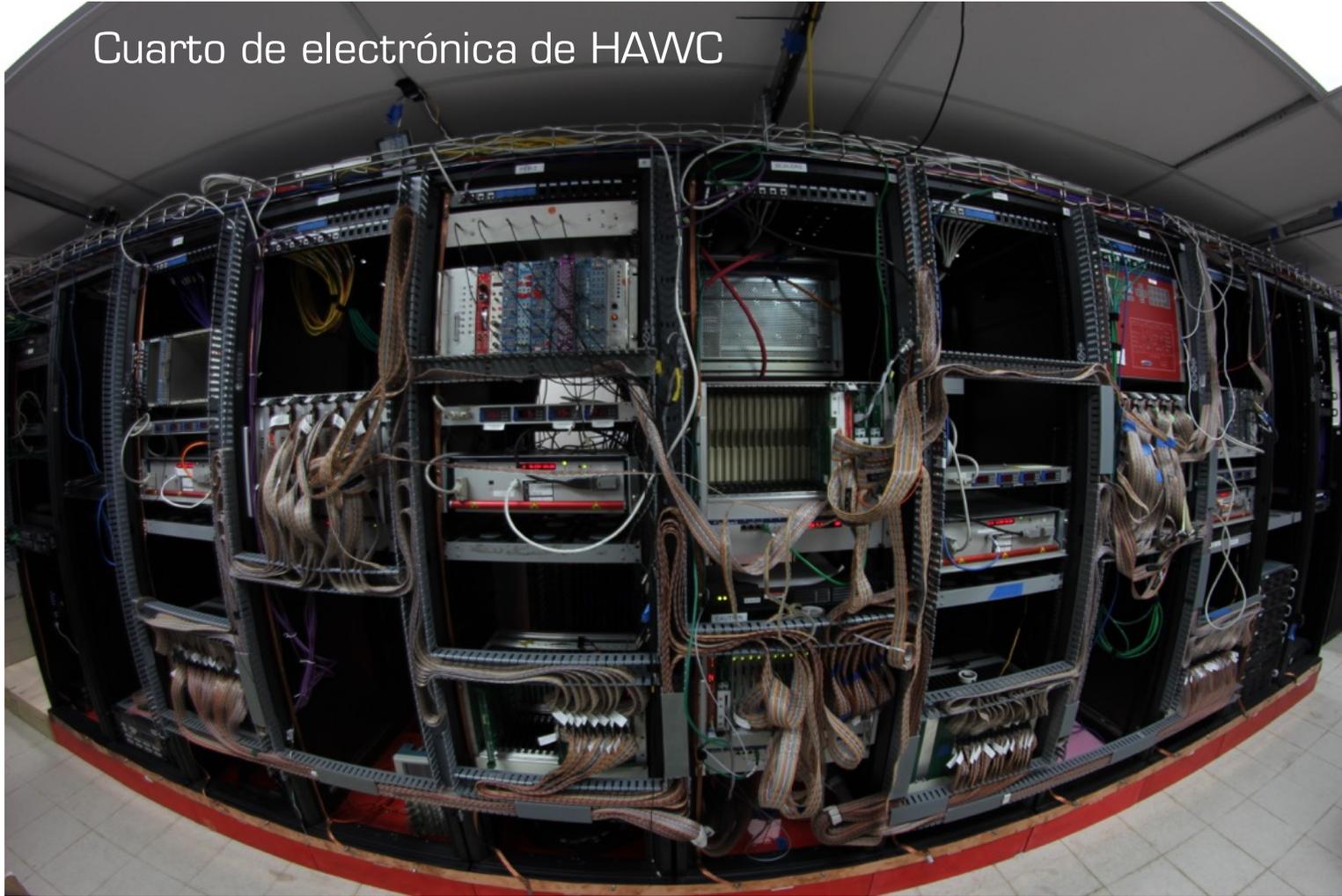
Desempeño de la separación γ /hadrón



Ejemplo para cascadas atmosféricas grandes (80% de los PMTs disponibles con señal)

Datos producidos por HAWC

Cuarto de electrónica de HAWC



Dos centros de almacenamiento y análisis:

- Universidad de Maryland
- Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM

Datos reconstruidos y analizados en tiempo real en la montaña (~ 4 seg.) con ~ 200 núcleos

Datos producidos por HAWC

HAWC produce:

Datos Raw: 530 MB/s

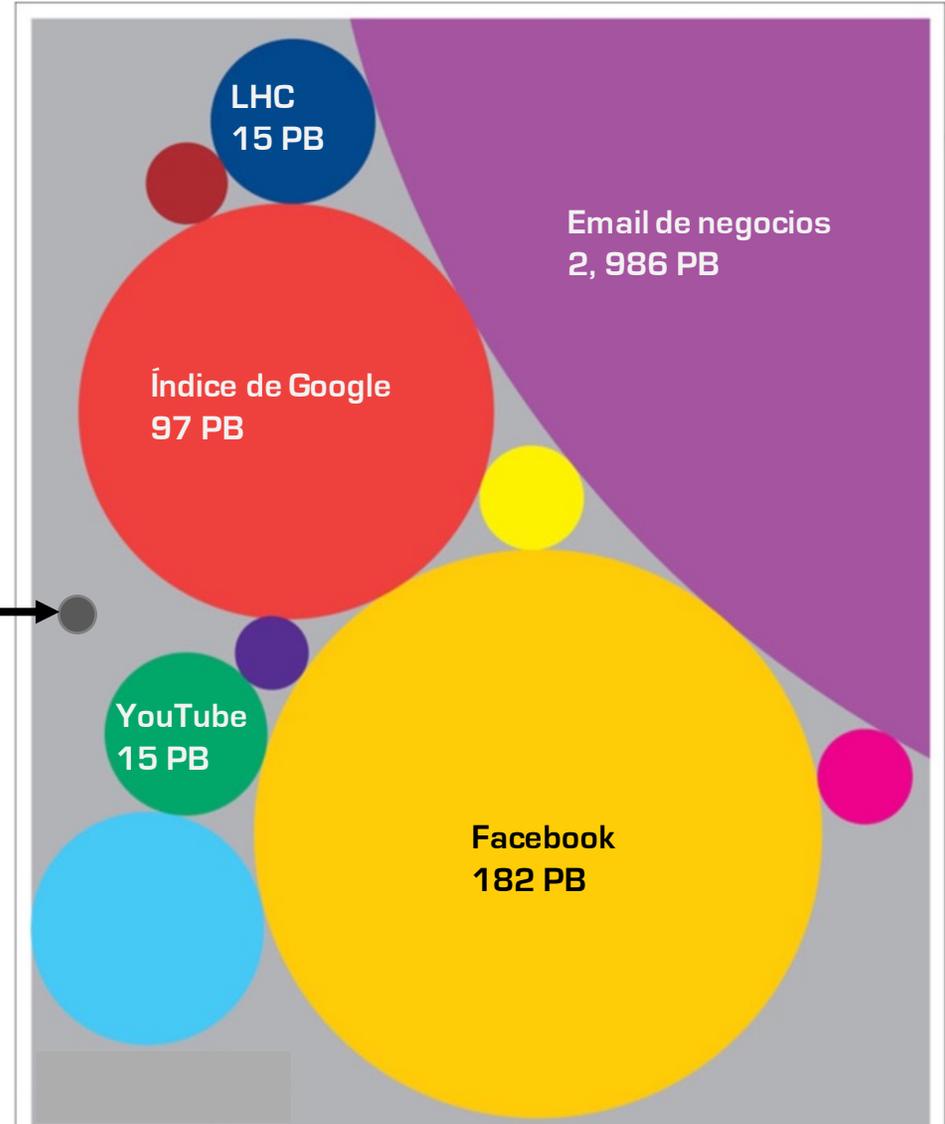
-De los cuáles se graban:

15-20 MB/s → 700 TB/año

2 copias idénticas de los datos ~2 PB/año

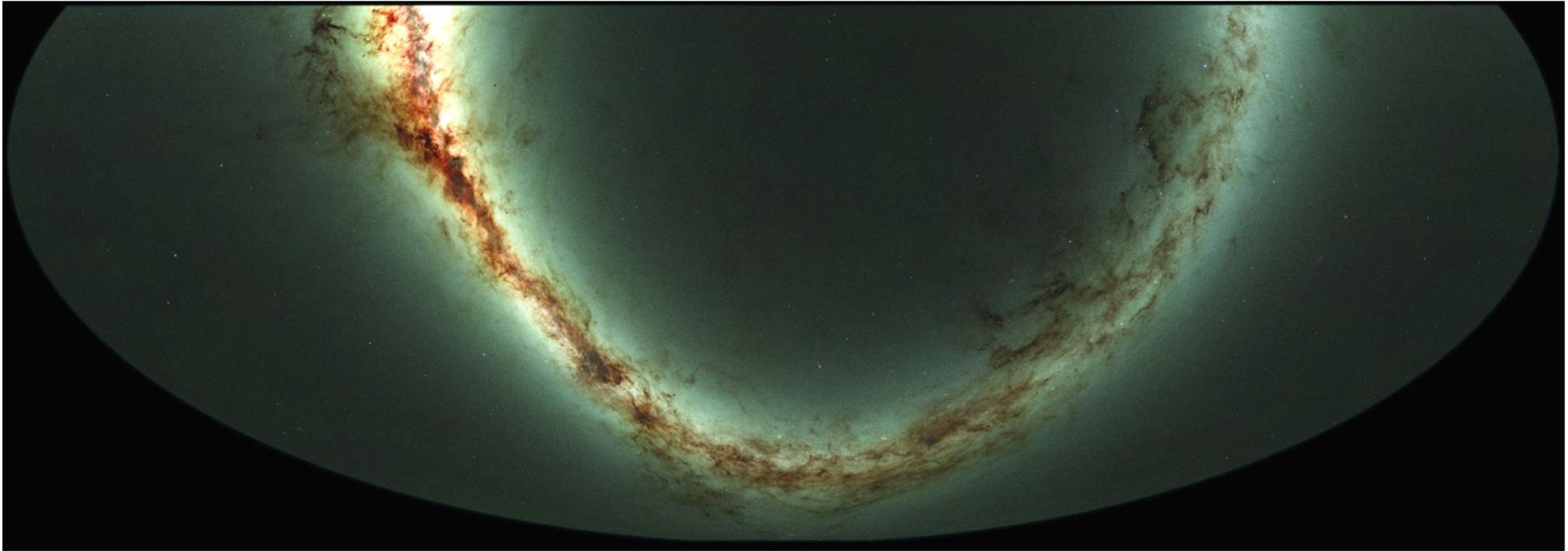
HAWC →

Datos anuales



<https://www.wired.com/2013/04/bigdata/>

El Universo en luz visible



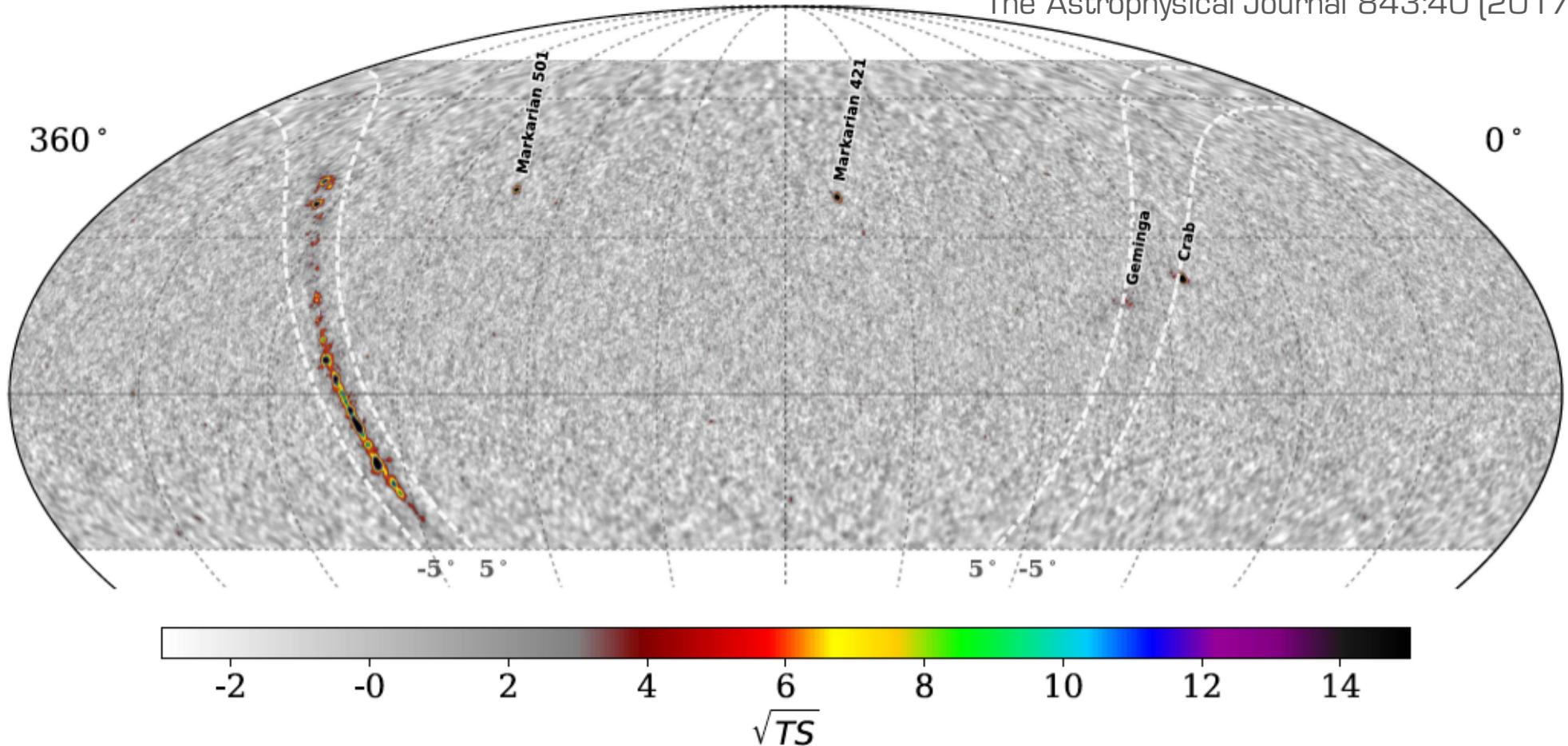
Danny Farrow, Pan-STARRS1 Science Consortium and
Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics

Imagen completa del Universo visible en Hawái ¡4 años fotografiando el cielo!
1500 Mega pixeles

Segundo catálogo de fuentes de rayos gamma

gamma

HAWC Collaboration
The Astrophysical Journal 843:40 (2017)

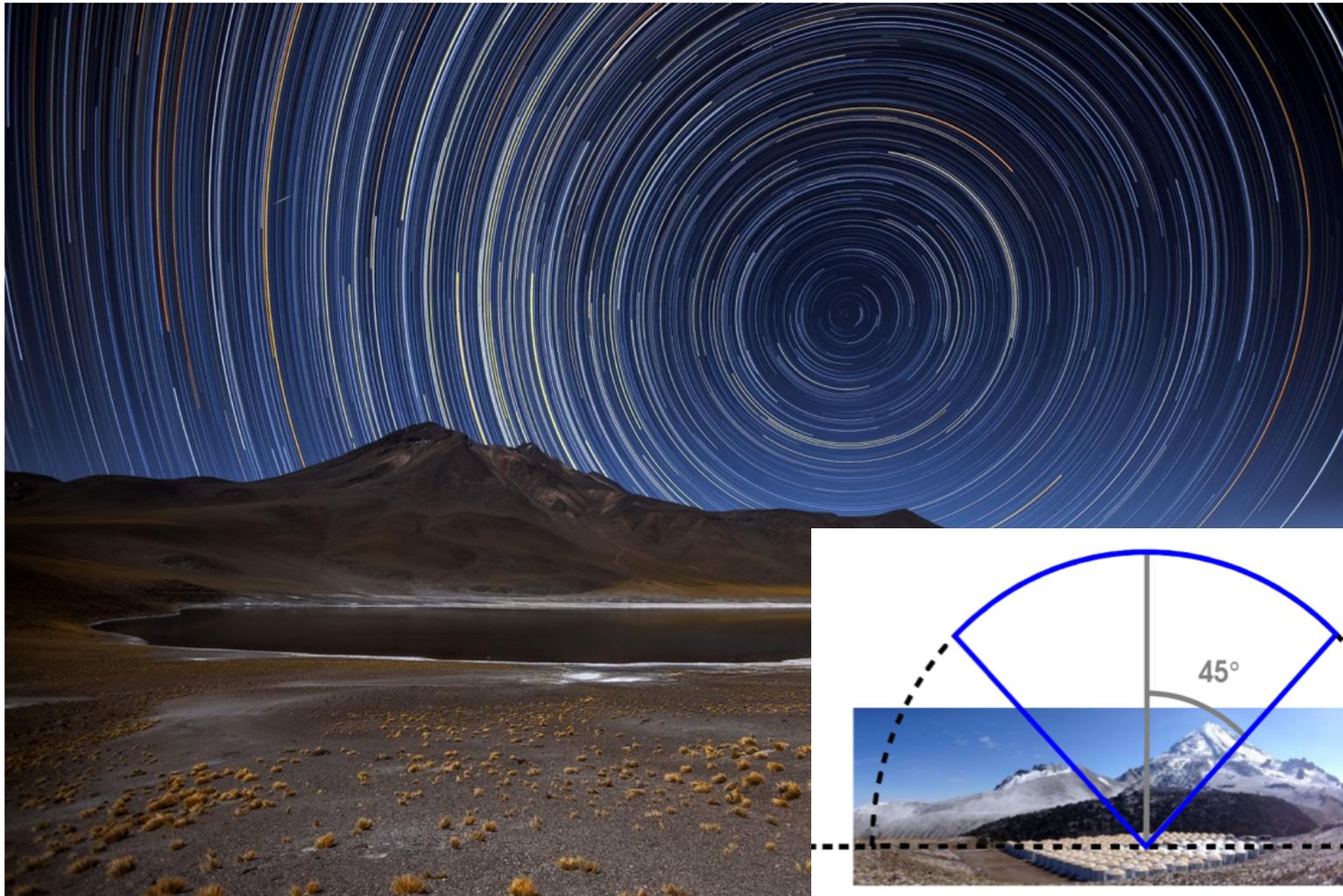


Mapa del cielo obtenido con 507 días de datos: el análisis más sensible en energías de TeV hasta ahora

Búsqueda de fuentes puntuales, índice espectral de 2.7

¿Qué son los huecos en el mapa de HAWC?

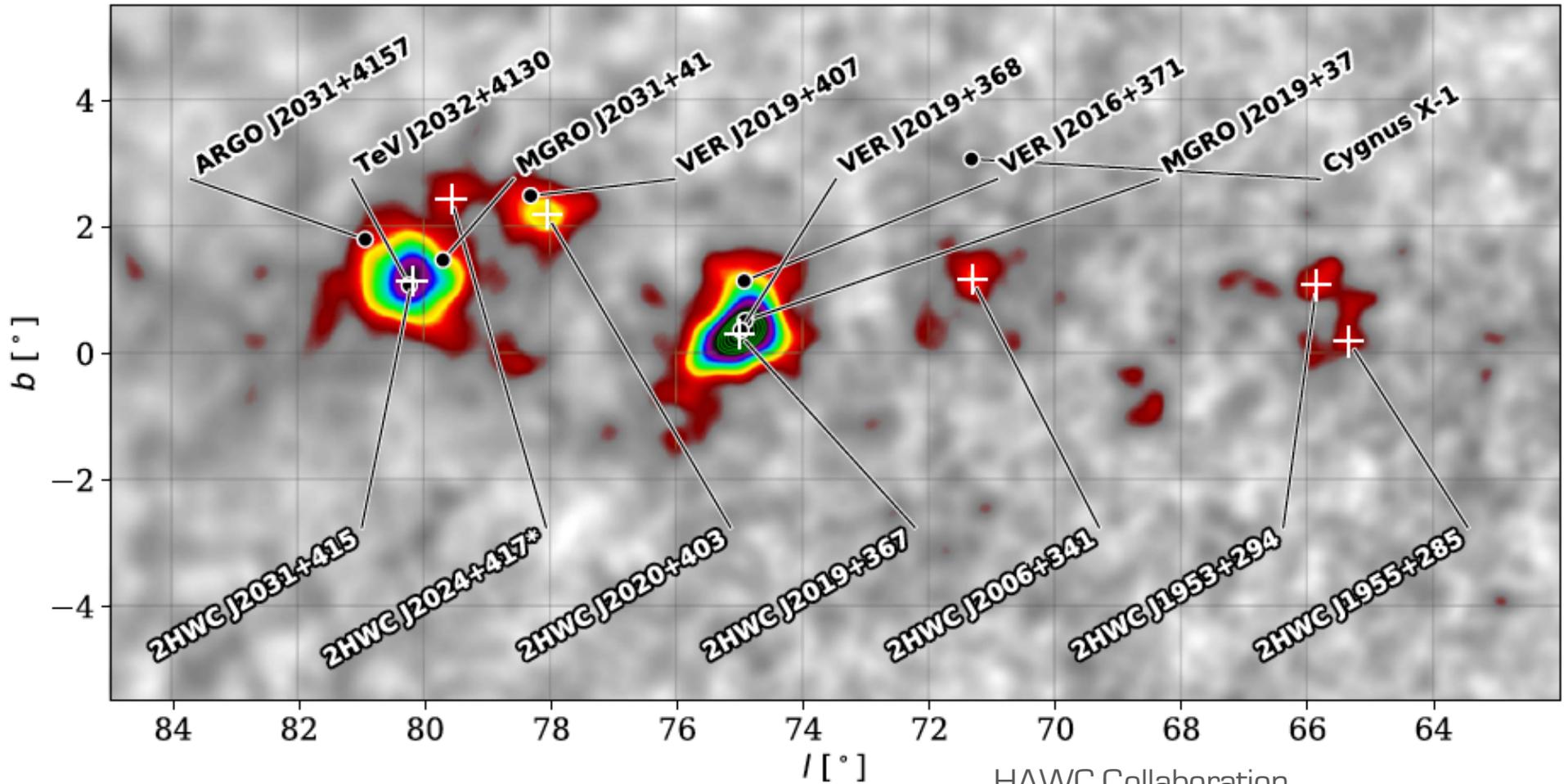
La fracción del Universo observable por HAWC depende de los movimientos de la Tierra



Polo Sur visto desde el desierto de Atacama

A. Duro/ESO

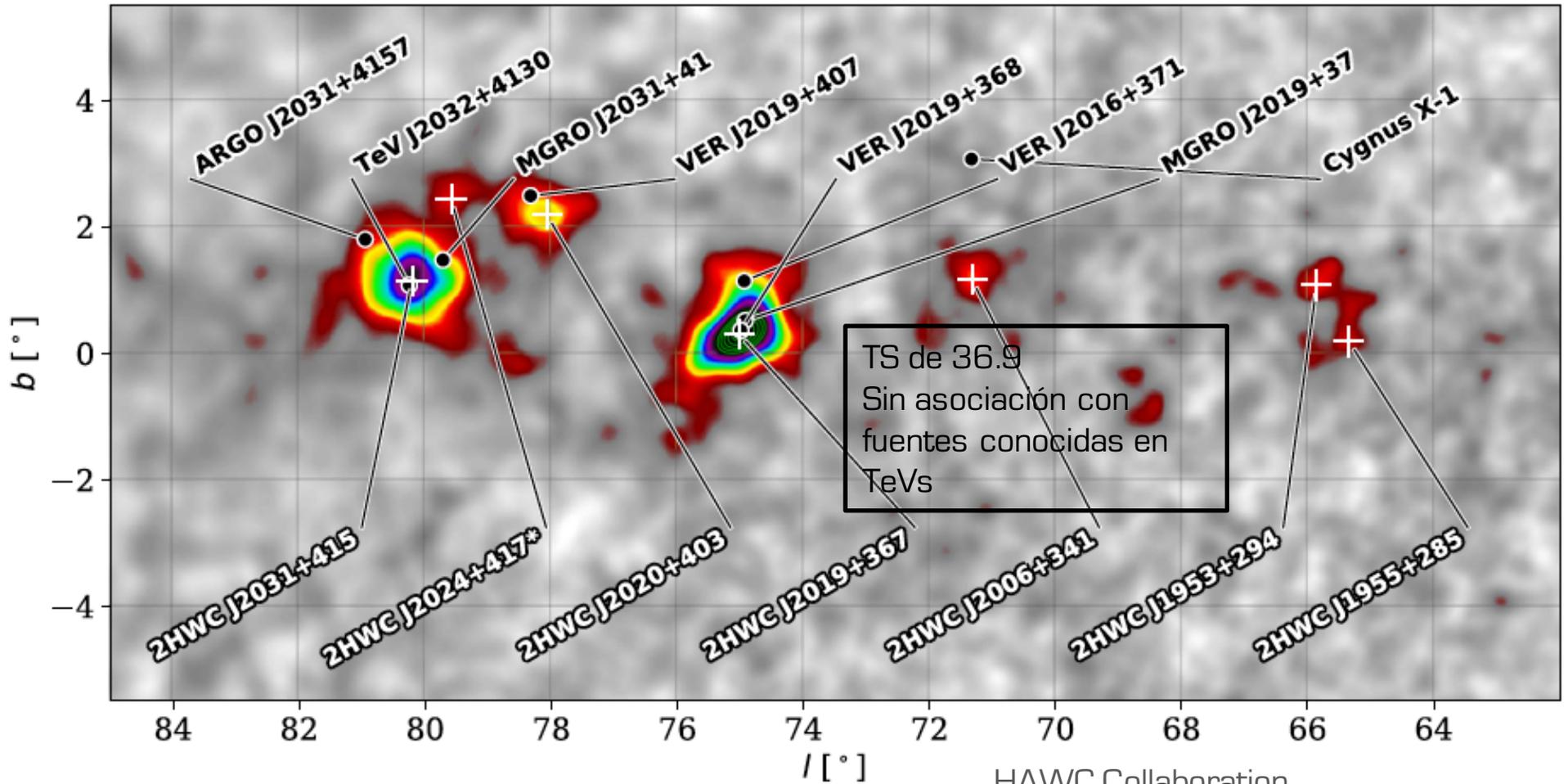
Plano galáctico (una pequeña sección)



HAWC Collaboration
The Astrophysical Journal 843:40 (2017)

39 fuentes detectadas, ¡19 nuevas! (sin asociación a fuentes conocidas en TeV)

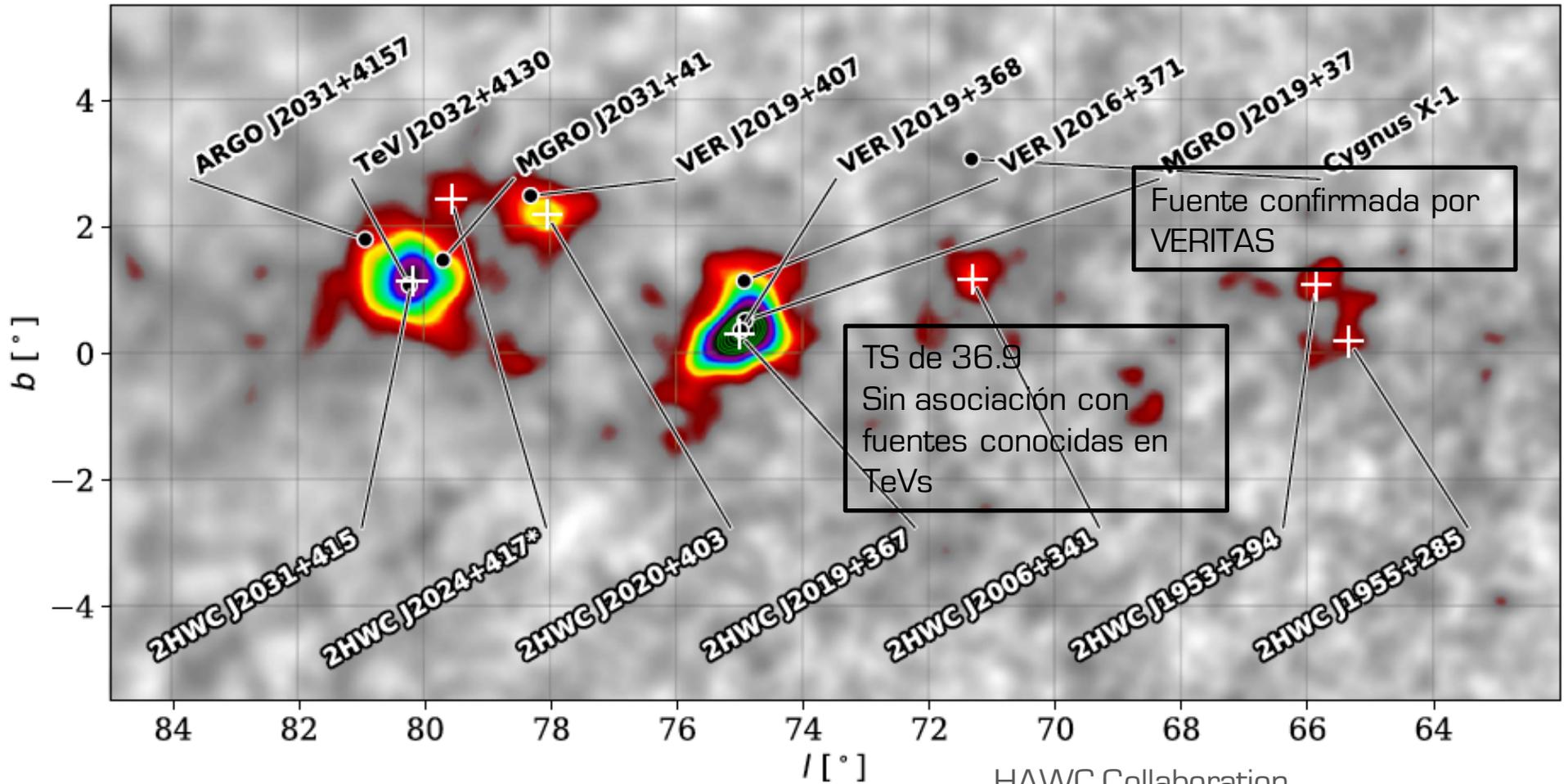
Plano galáctico (una pequeña sección)



HAWC Collaboration
The Astrophysical Journal 843:40 (2017)

39 fuentes detectadas, ¡19 nuevas! (sin asociación a fuentes conocidas en TeV)

Plano galáctico (una pequeña sección)



HAWC Collaboration
The Astrophysical Journal 843:40 (2017)

39 fuentes detectadas, ¡19 nuevas! (sin asociación a fuentes conocidas en TeV)

Límites en el cociente \bar{p}/p en TeVs

- Los datos utilizados para el análisis corresponden al periodo Noviembre 2014- Agosto 2017
- 81×10^9 rayos cósmicos después de hacer cortes de selección

Bin	log(E/GeV)	Events [10^9]
0	3.0 - 3.2	3.49
1	3.2 - 3.4	17.67
2	3.4 - 3.6	18.98
3	3.6 - 3.8	13.50

Bin	log(E/GeV)	Events [10^9]
4	3.8 - 4.0	11.21
5	4.0 - 4.2	7.63
6	4.2 - 4.4	4.45
7	> 4.4	4.44

- La estimación en energía se basa en tablas de probabilidad que utilizan la distribución lateral de hits para diferentes energías y ángulos cenitales de llegada
- Para un ángulo cenital y posición del núcleo, se obtiene la probabilidad para cada PMT para las diferentes energías simuladas
- La energía asignada corresponde a la máxima probabilidad

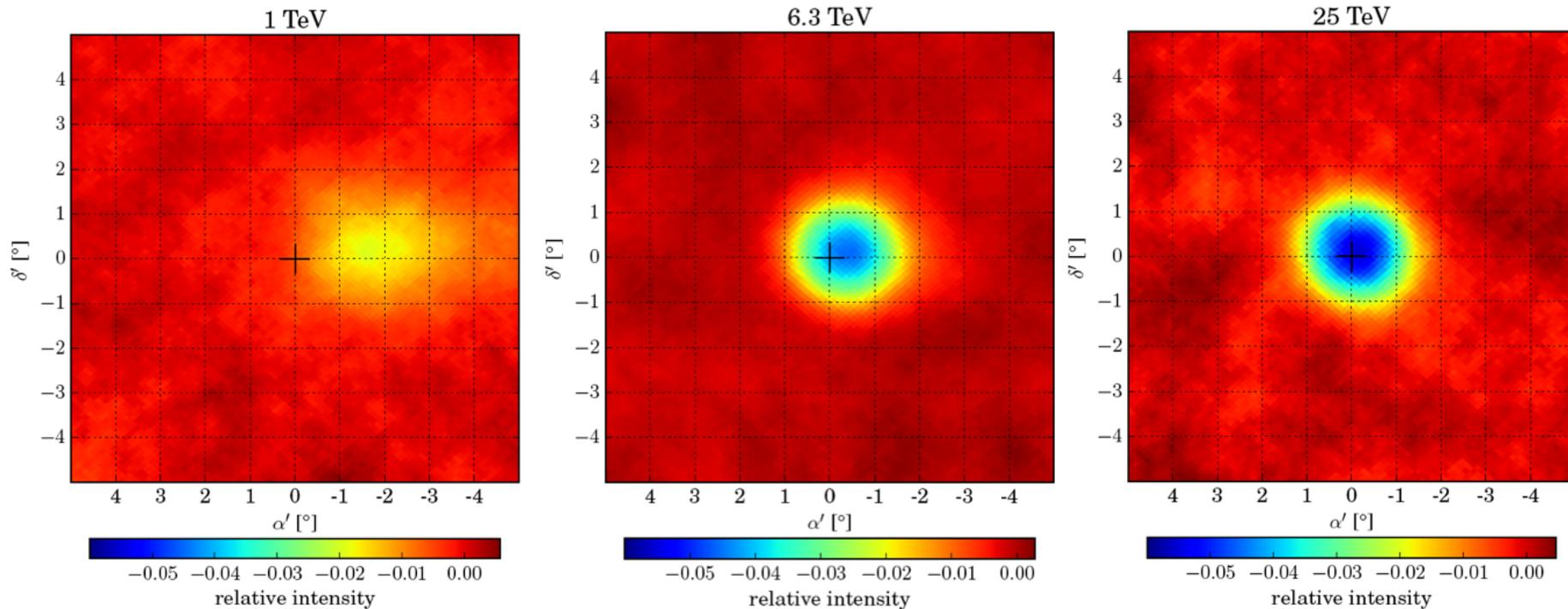
El flujo de rayos cósmicos se estudia con mapas del cielo hechos a partir de una malla de pixeles (α_i, δ_i) . El exceso o déficit de rayos cósmicos en cada pixel se cuantifica por medio de:

$$\delta I = \frac{N(\alpha_i, \delta_i) - \langle N(\alpha_i, \delta_i) \rangle}{\langle N(\alpha_i, \delta_i) \rangle}$$

$N(\alpha_i, \delta_i)$: Eventos en el mapa de datos

$\langle N(\alpha_i, \delta_i) \rangle$: Referencia isotrópica

Límites en el cociente \bar{p}/p en TeVs



Mapas de la Luna, construidos a partir de:

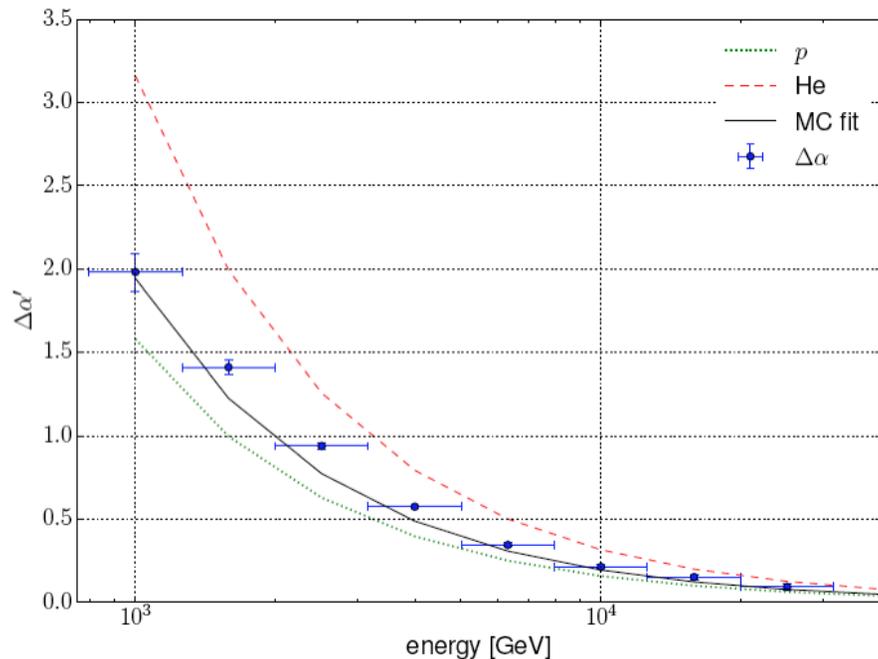
$$\alpha' = \alpha - \alpha_{\text{moon}} \quad \delta' = \delta - \delta_{\text{moon}}$$

HAWC Collaboration
*PRD **97**, 102005 2018*

En base a simulaciones, la desviación angular para un hadrón con carga Z y energía E en la ubicación de HAWC está dada por:

$$\delta\omega \simeq 1.6^\circ Z(E/1000 \text{ GeV})^{-1}$$

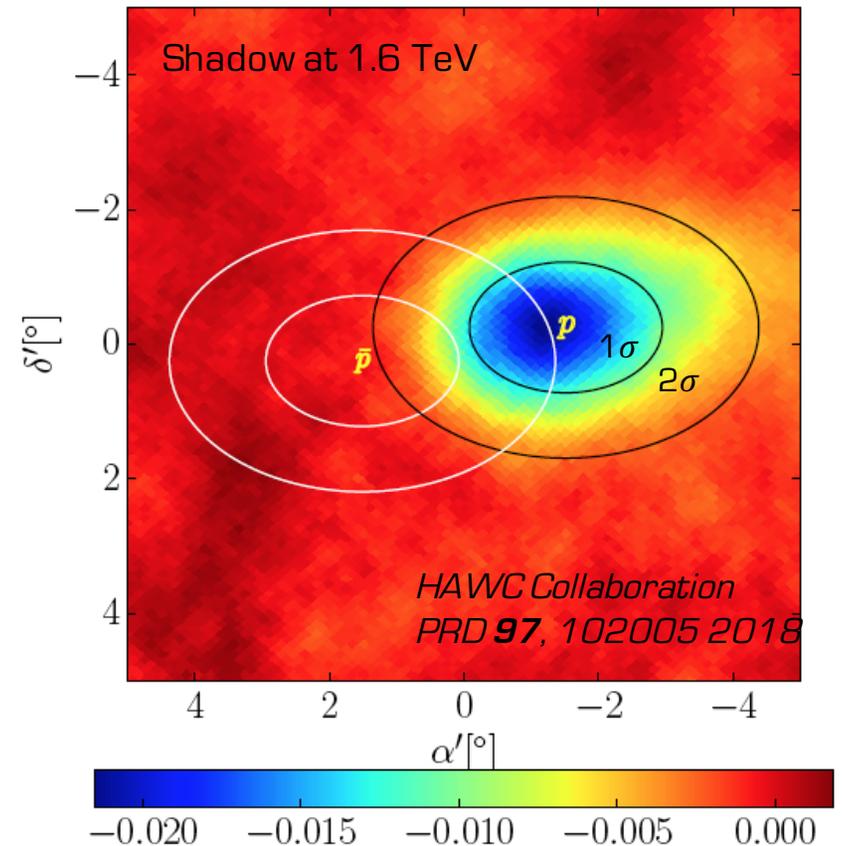
Límites en el cociente \bar{p}/p en TeVs



$$Z = 1.30 \pm 0.02$$

A menos de 10 TeV, $70 \pm 2\%$ del flujo es debido a protones

Buscar una sombra producida por los \bar{p}



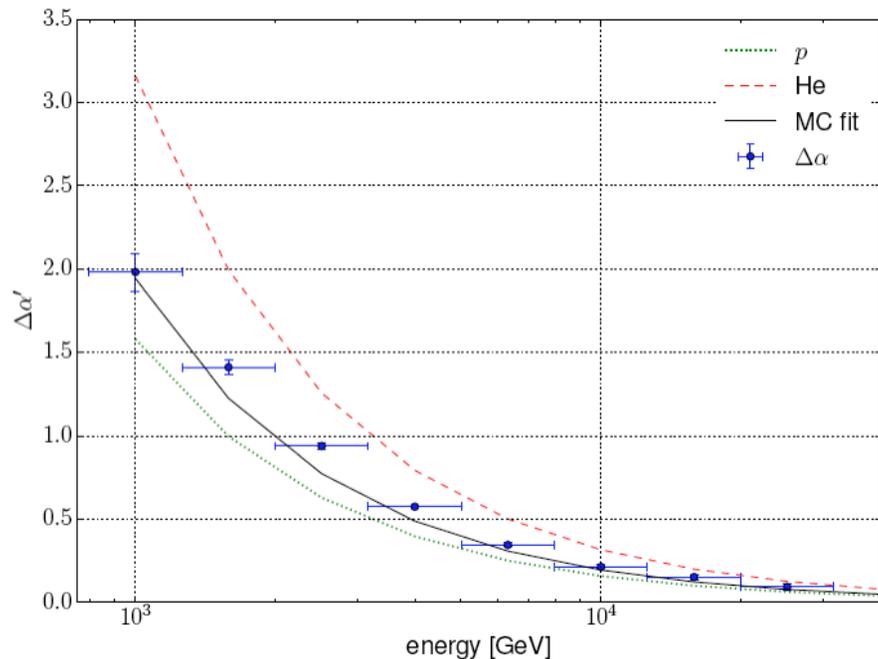
$$f_i(x, y) = A \exp[-a(x - x_0)^2 + 2b(x - x_0)(y - y_0) - c(y - y_0)^2]$$

$$a(\theta, \sigma_x, \sigma_y)$$

$$b(\theta, \sigma_x, \sigma_y)$$

$$c(\theta, \sigma_x, \sigma_y)$$

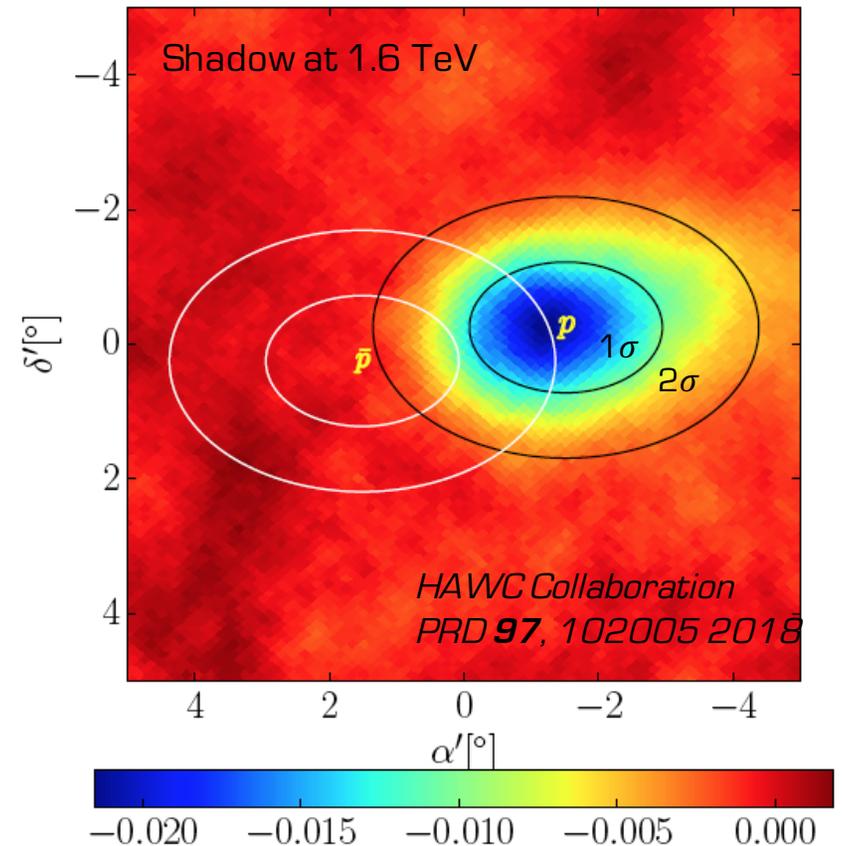
Límites en el cociente \bar{p}/p en TeVs



$$Z = 1.30 \pm 0.02$$

A menos de 10 TeV, $70 \pm 2\%$ del flujo es debido a protones

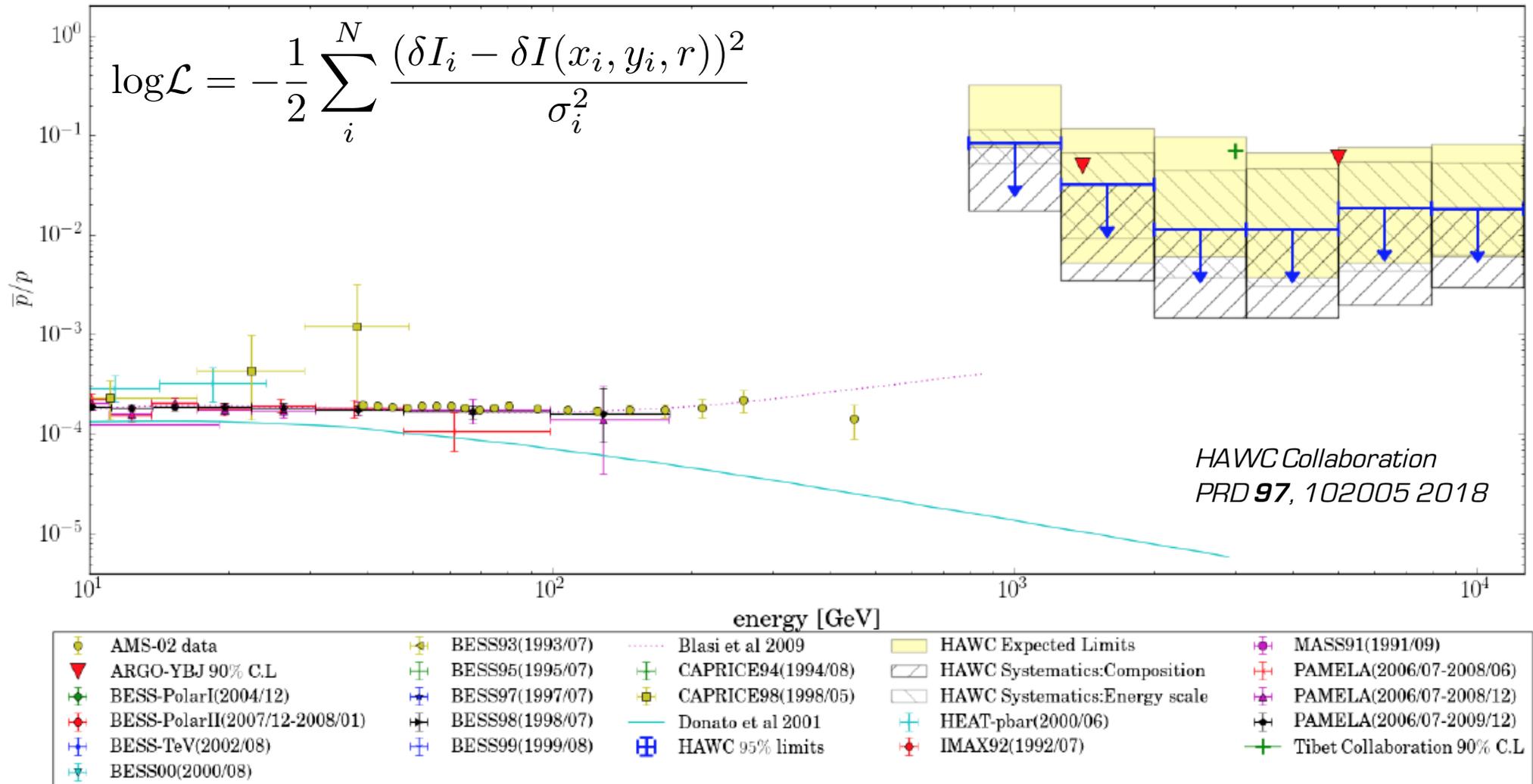
Buscar una sombra producida por los \bar{p}



$$f_i(x, y) = A \exp[-a(x - x_0)^2 + 2b(x - x_0)(y - y_0) - c(y - y_0)^2]$$

$$\delta I(x, y) = F_p(x, y) + F_{\bar{p}}(x, y) = F_p(x, y) + r \cdot F_p(x, y)$$

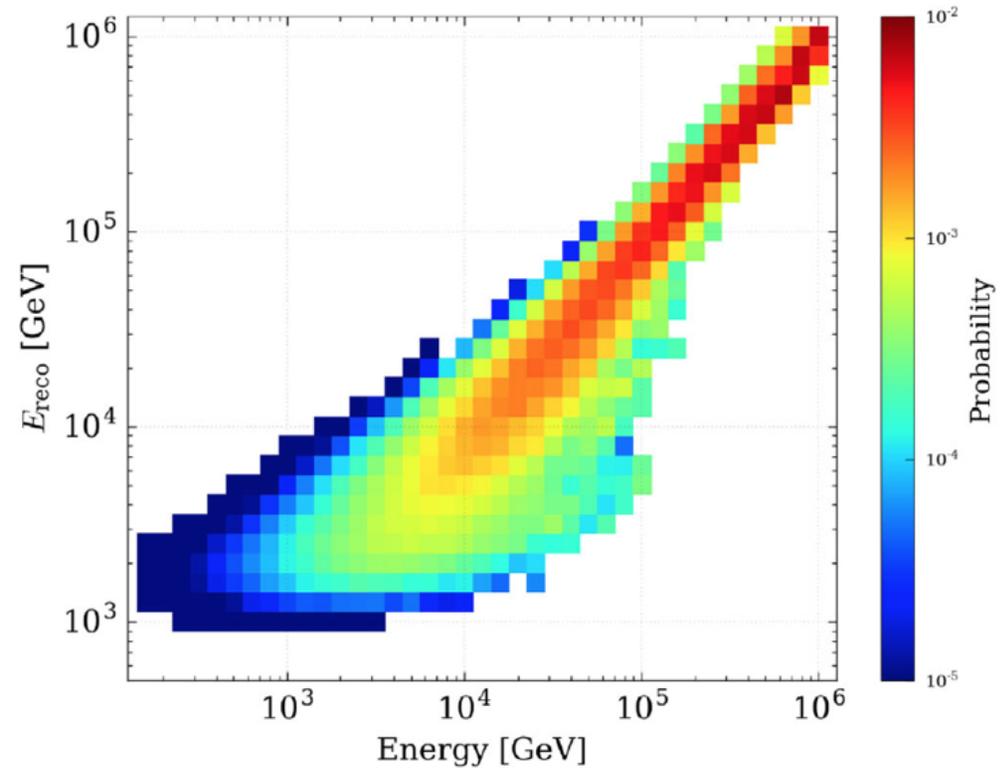
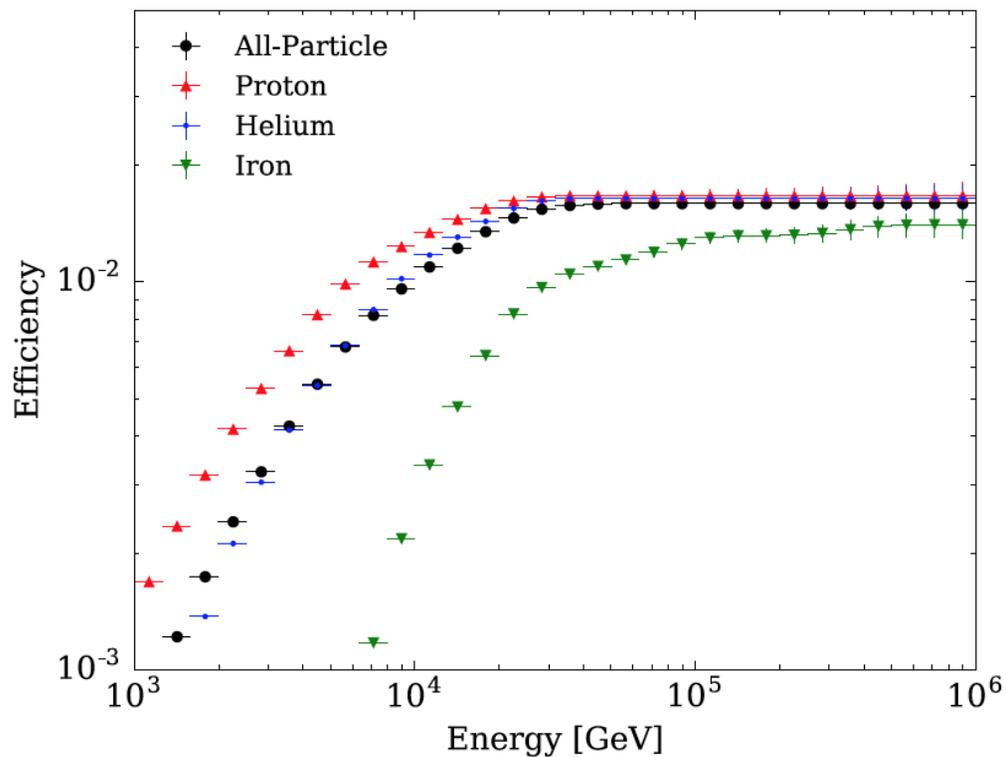
Límites en el cociente \bar{p}/p en TeVs



HAWC provee los mejores límites a energías de TeVs

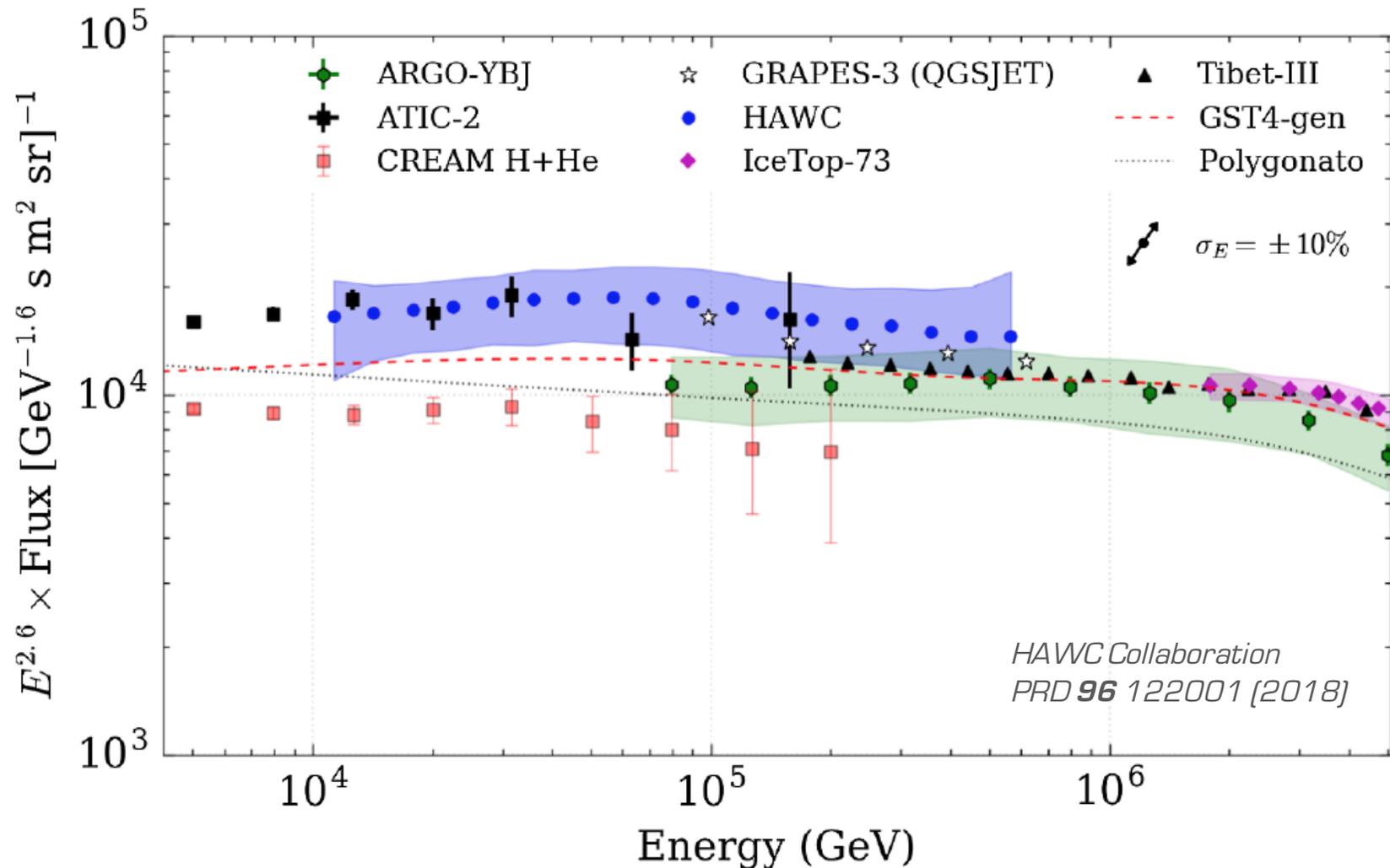
Espectro de rayos cósmicos

HAWC puede proporcionar datos entre aquellos obtenidos con experimentos de detección directa y los grandes detectores de cascadas atmosféricas en el rango de PeVs



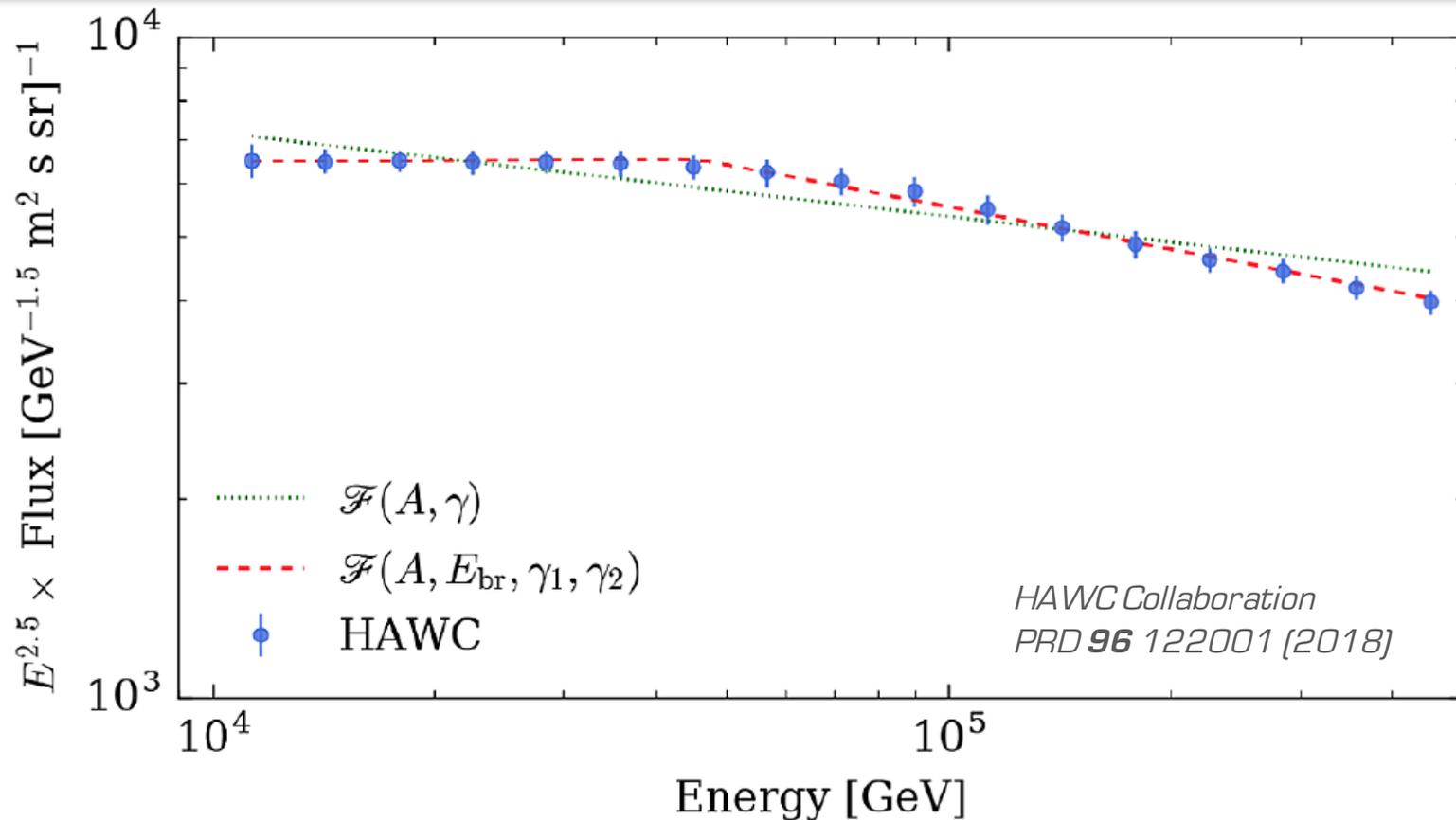
Eficiencia y matriz de respuesta

Comparación con otros experimentos



Las mediciones de HAWC son sistemáticamente más altas que las de otros experimentos, pero consistentes dentro del error sistemático

Espectro de rayos cósmicos

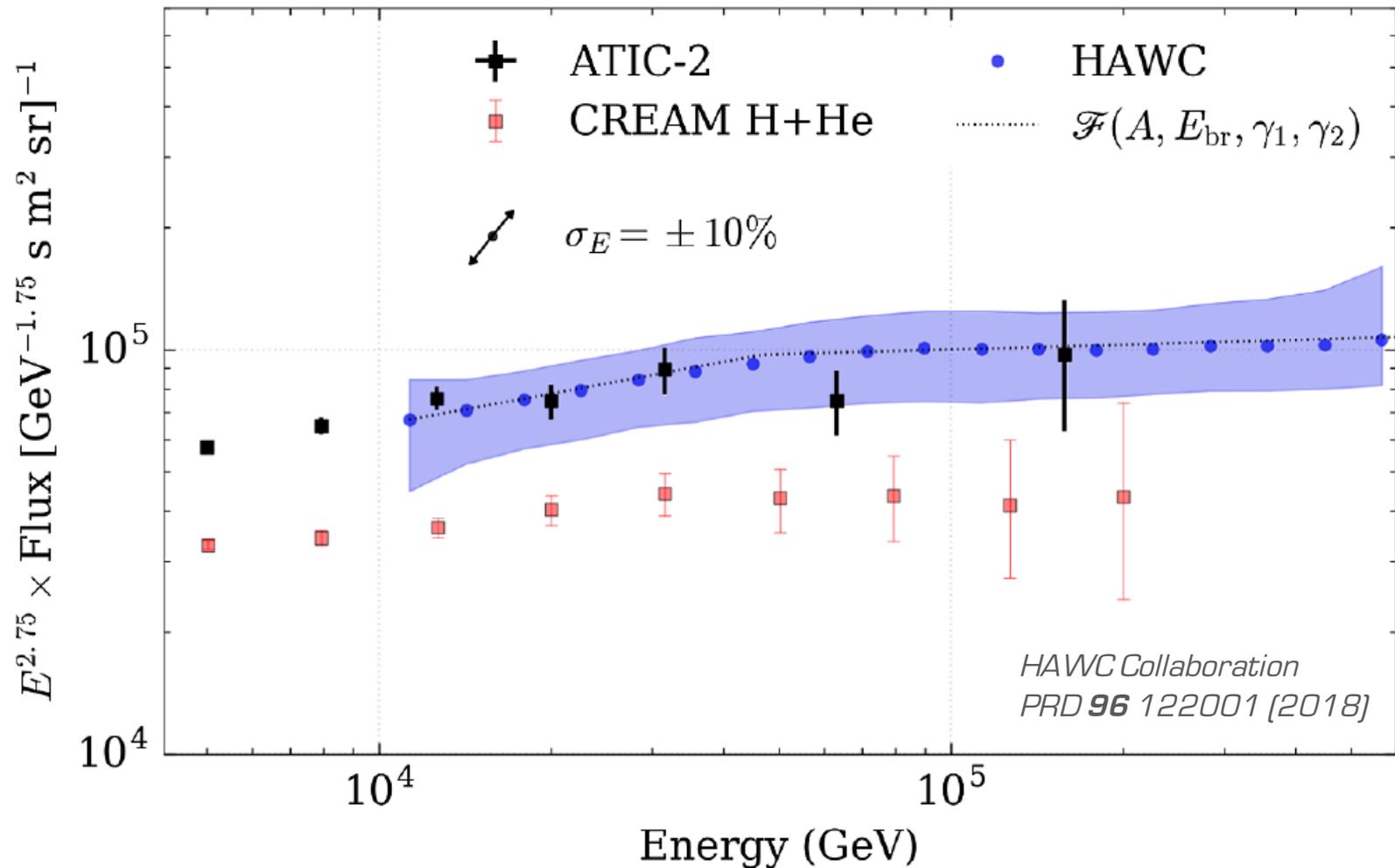


$$\mathcal{F}(A, E_{br}, \gamma_1, \gamma_2) = \begin{cases} A \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right)^{\gamma_1}, & E < E_{br} \\ A \cdot \left(\frac{E_{br}}{E_0}\right)^{\gamma_1 - \gamma_2} \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right)^{\gamma_2}, & E \geq E_{br} \end{cases}$$

$$\mathcal{F}(A, \gamma) = A \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right)^{\gamma} \quad \Delta\chi^2 = 29.2 \rightarrow p = 4.6 \times 10^{-7}$$

Se favorece el modelo de una ley de potencias con quiebre

Acercamiento a la región con el cambio de índice espectral

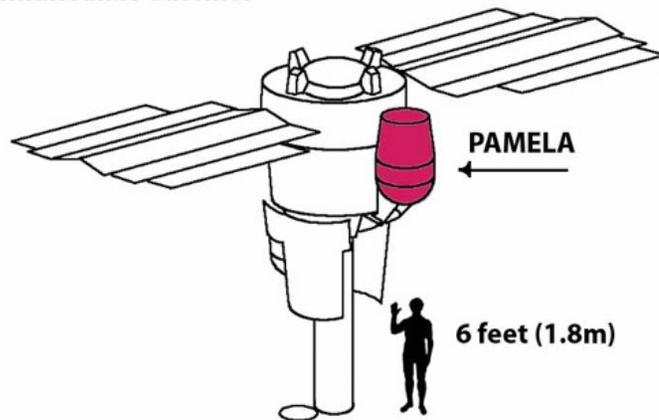


El ajuste a los datos sugieren un cambio en el índice espectral a una energía de $E_{\text{br}} = 45.7 \pm 1.1 \text{ TeV}$ pasando de $\gamma_1 = -2.49 \pm 0.01$ $\gamma_2 = -2.71 \pm 0.01$

El misterioso exceso de positrones

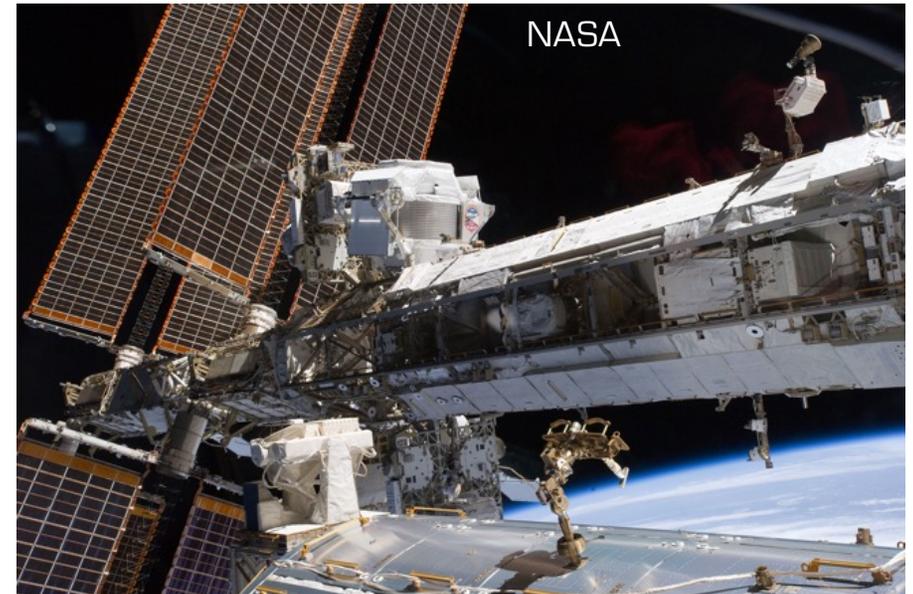
Los detectores PAMELA y AMS han medido un exceso de positrones (anti electrones) con energías > 10 GeV

Resurs-DK
Reconnaissance Satellite



PAMELA

(Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics)



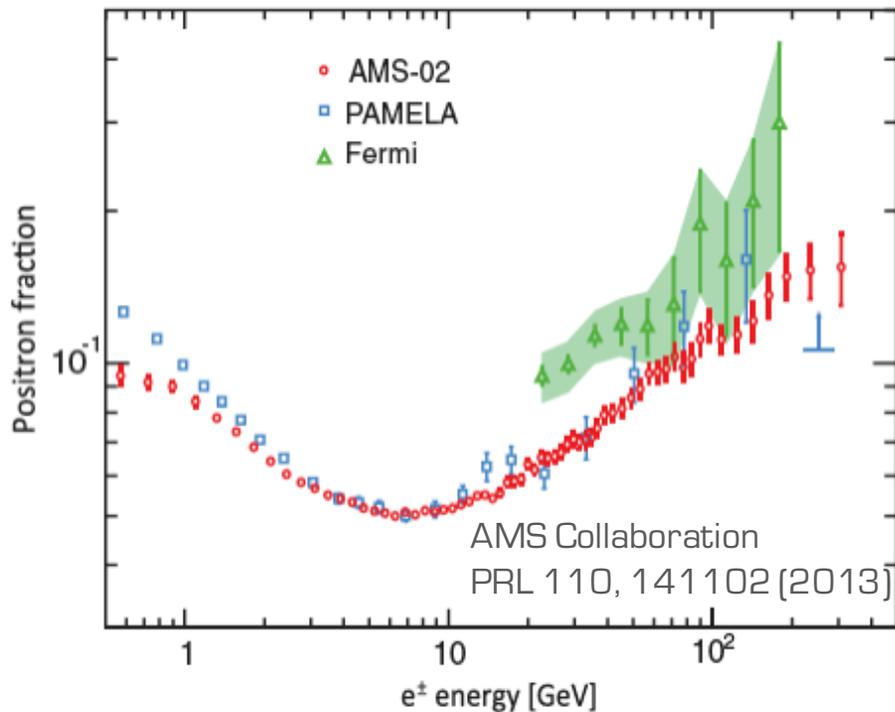
AMS

(Alpha Magnetic Spectrometer)

En los modelos teóricos comunes, la antimateria debería disminuir conforme aumenta la energía

El misterioso exceso de positrones

Los detectores PAMELA y AMS han medido un exceso de positrones (anti electrones) con energías > 10 GeV



¿A qué se debe este exceso?

¿A un pulsar cercano? o ¿es el producto de la aniquilación de materia oscura?

Requisitos para la hipótesis del pulsar:

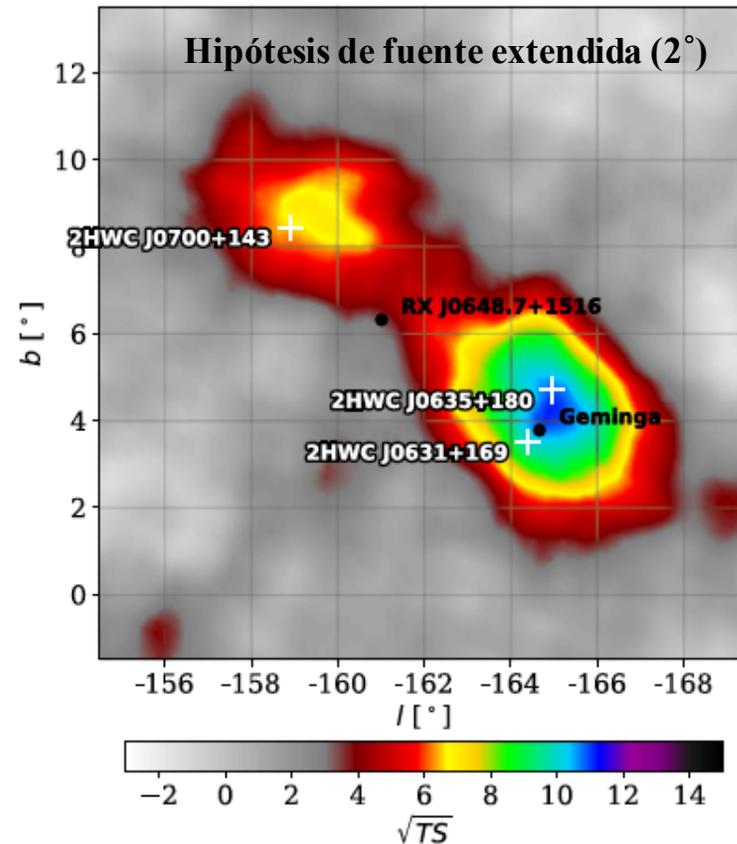
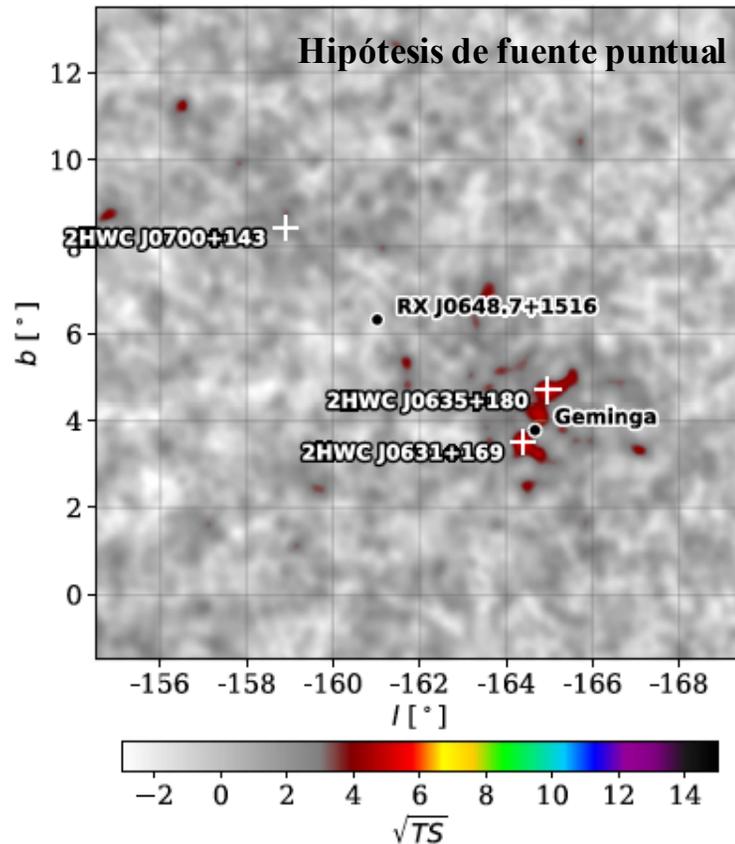
- Suficientemente viejo para que recibamos en la Tierra su viento de e^+e^-
- Suficientemente joven para que aún emita este viento

El misterioso exceso de positrones

Geminga (3×10^5 años, distancia de 250 pc) y PSR B056+14 (1×10^5 años, distancia de 288 pc) son candidatos a ser las fuentes de los positrones. HAWC es el único instrumento capaz de caracterizar a estas fuentes debido a sus dimensiones

HAWC Collaboration

The Astrophysical Journal 843:40 (2017)

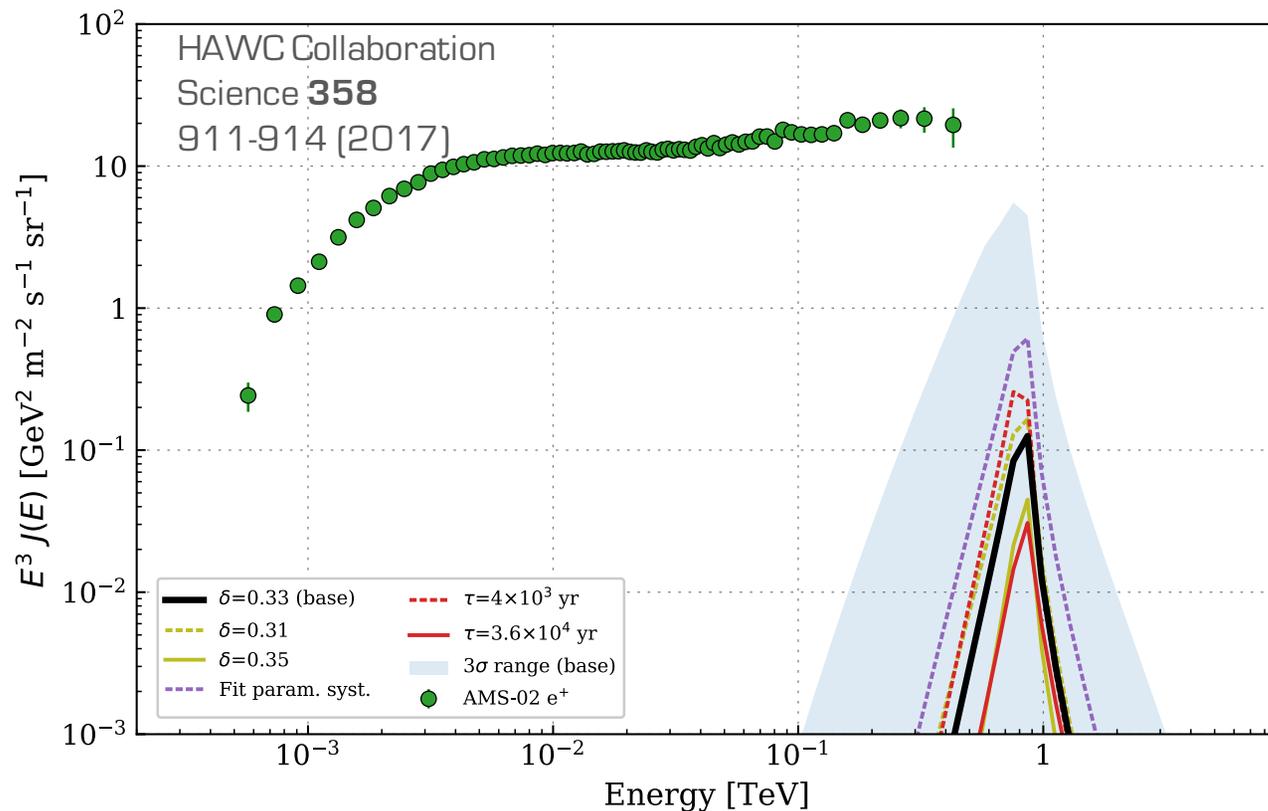


El predecesor de HAWC, Milagro, era el único instrumento capaz de detectar a Geminga en TeV, 2HWC J0700+143 es una nueva fuente similar, descubierta por HAWC

El misterioso exceso de positrones

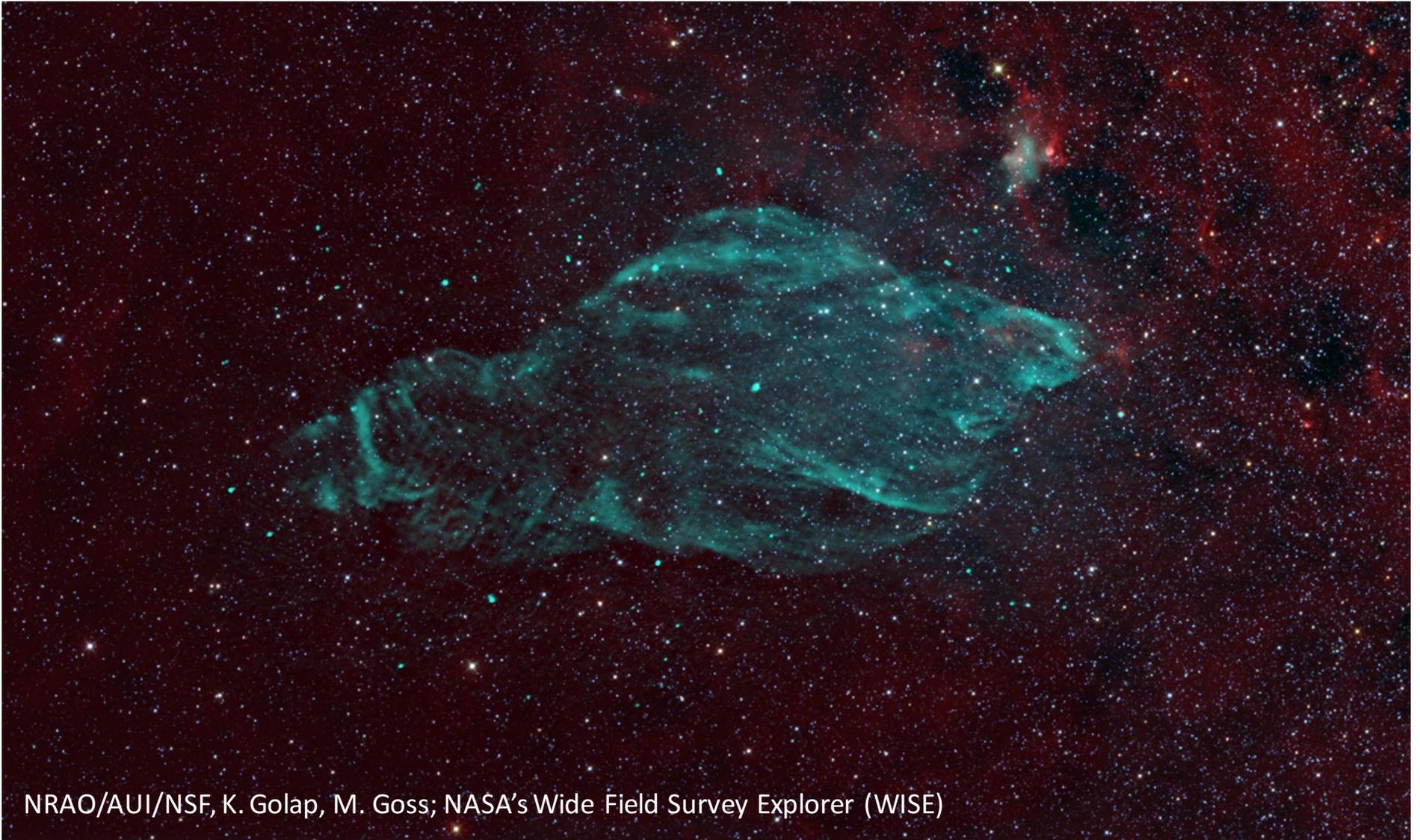
El flujo de rayos gamma detectado por HAWC es producido por los leptones mientras se propagan a través del MIS y sufren dispersión inversa de Compton en el fondo de microondas. Usando las propiedades medidas con HAWC, podemos inferir la propagación de los e^\pm hacia la Tierra

Contribución
de Geminga



El flujo de positrones no puede ser explicado si tiene como fuentes a Geminga y a 2HWC J0700+143

El remanente de supernova W50



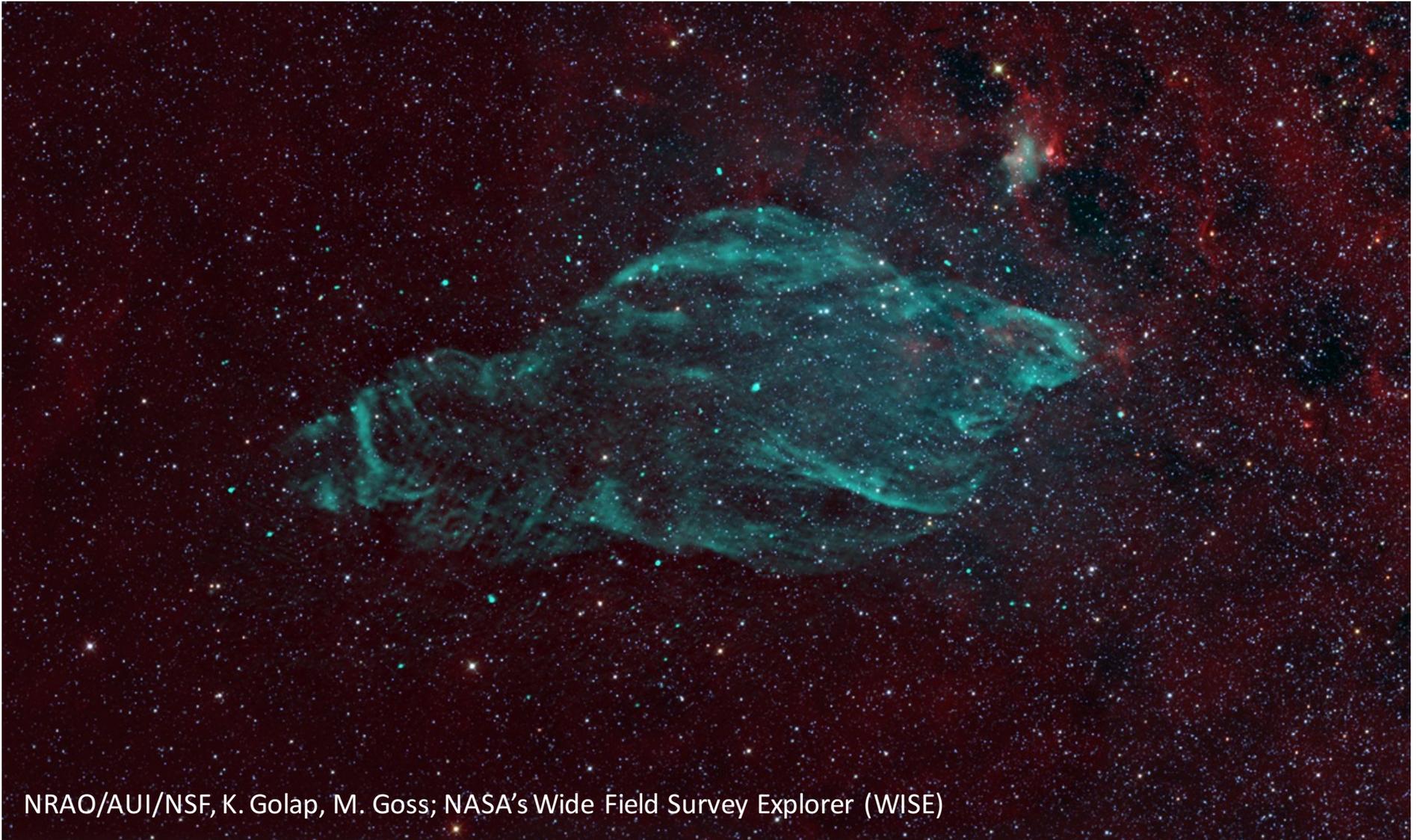
NRAO/AUI/NSF, K. Golap, M. Goss; NASA's Wide Field Survey Explorer (WISE)

La Nebula del Manatí: Remante de supernova a 18,000 años luz

El remanente de supernova W50



El remanente de supernova W50

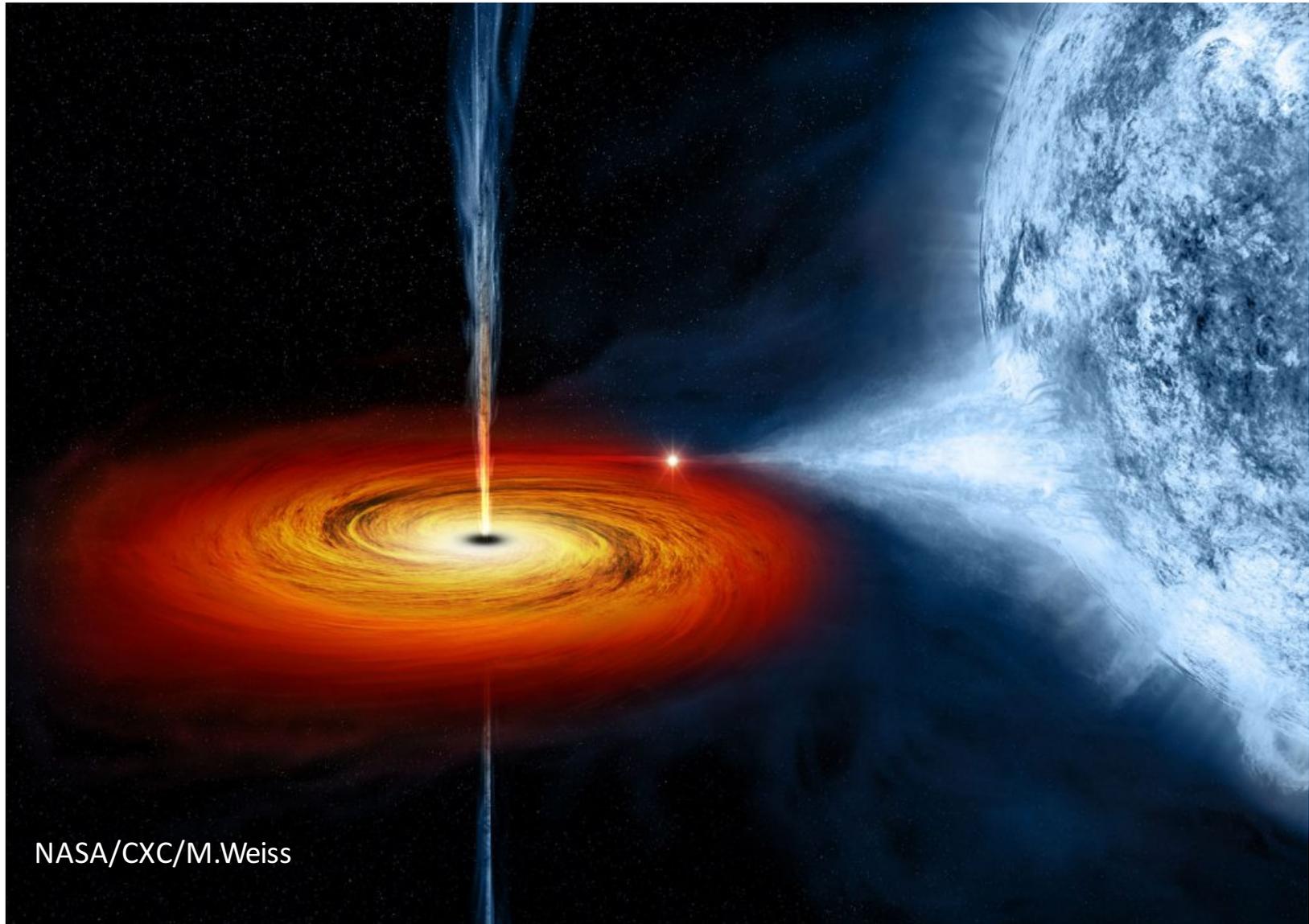


NRAO/AUI/NSF, K. Golap, M. Goss; NASA's Wide Field Survey Explorer (WISE)

La Nebula del Manatí: Remante de supernova a 18,000 años luz

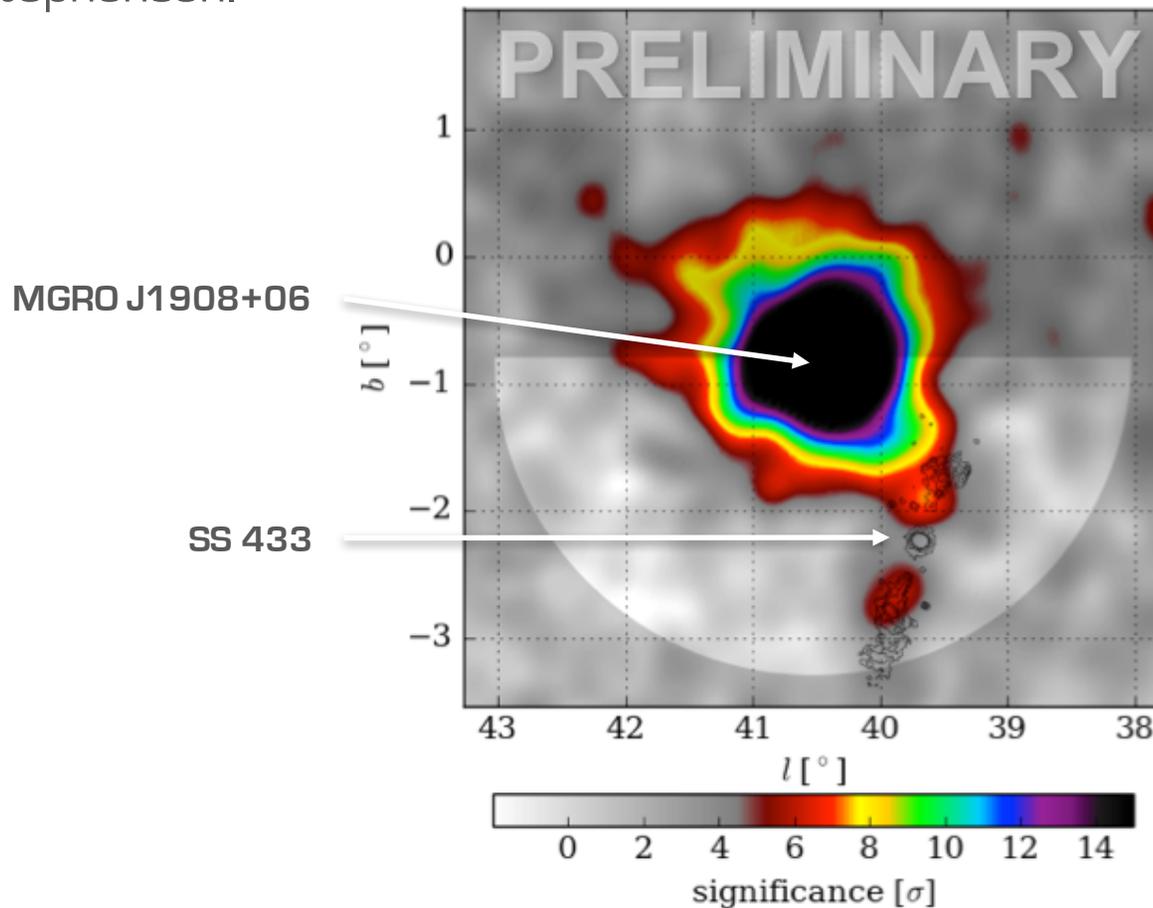
Aceleradores galácticos: microcuasares

Sistemas binarios: estrella – objeto compacto (agujero negro o estrella de neutrones)



SS 433

Descubierto en 1979. El objeto número 433 del catálogo de estrellas de Sanduleak y Stephenson.



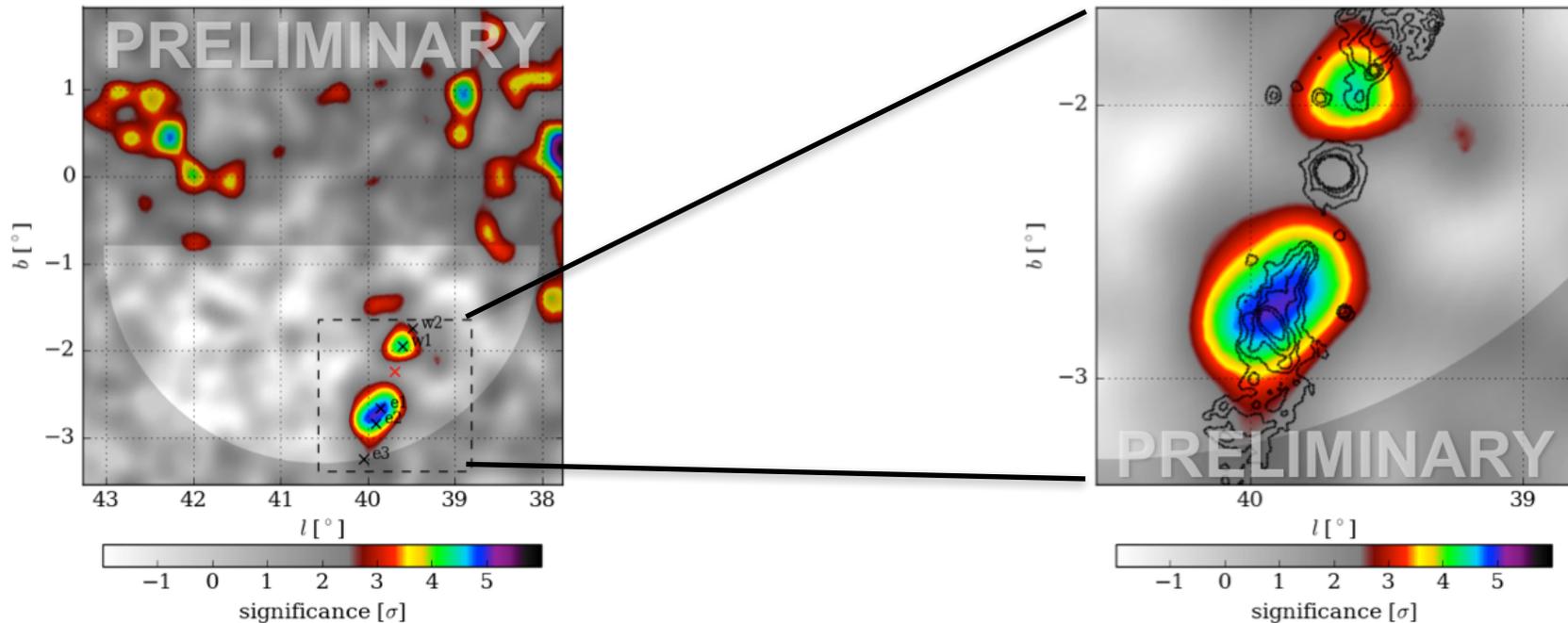
MGRO J1908+06 es una fuente extendida descubierta por el predecesor de HAWC

Es una estructura que rodea a un pulsar, como el Cangrejo

Líneas: emisión en rayos X de SS 433

SS 433 es un candidato a ser un acelerador en nuestra galaxia, pero la búsqueda de rayos gamma no ha sido exitosa, se encuentra a 5.5 kpc de la Tierra

SS 433



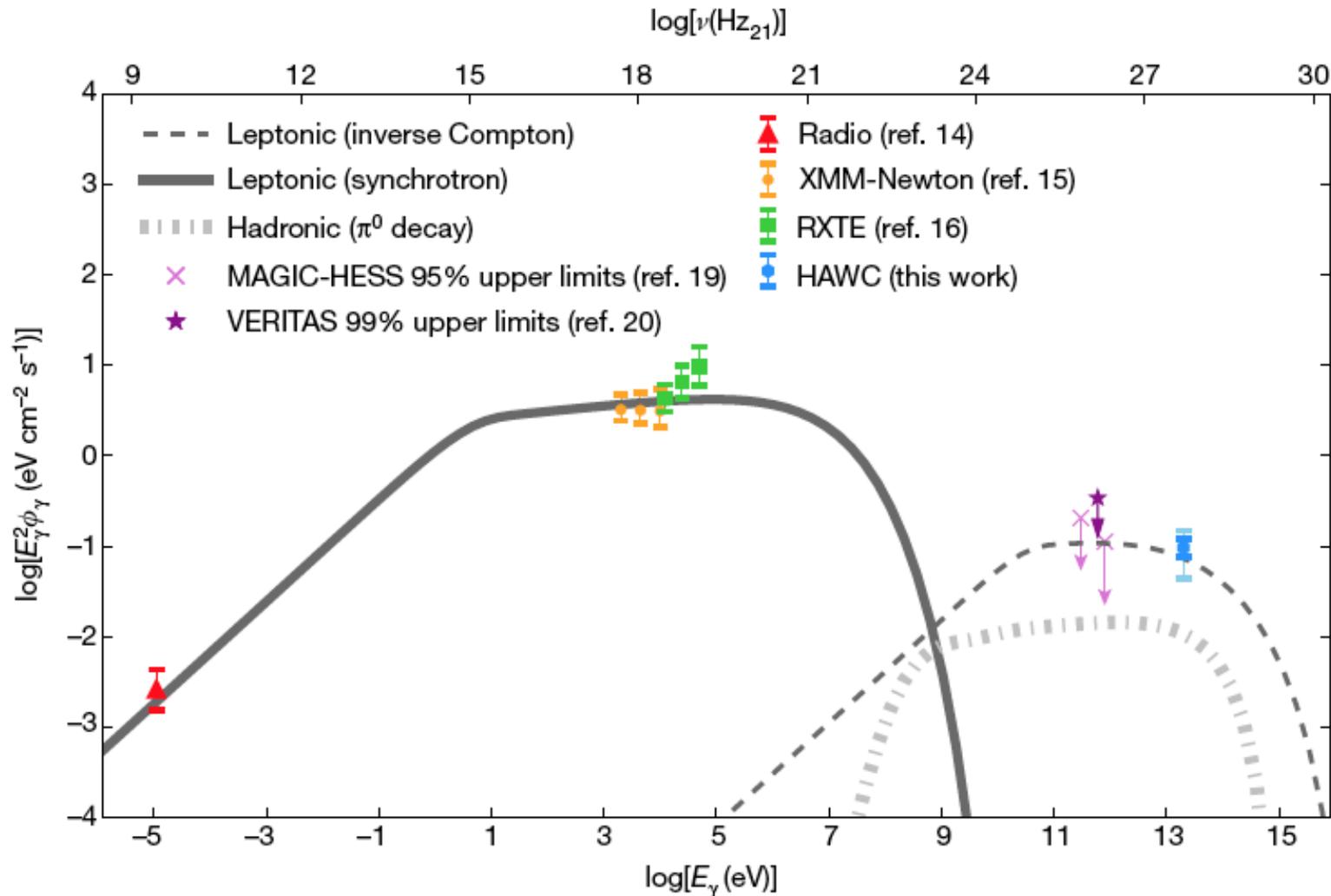
Mapa residual:
resultado de substrair a la fuente MGRO
J19008+06

Se observa emisión de rayos gamma en
TeV en los jets de SS 433

La aceleración ocurre en los jets, no en el
centro del sistema binario

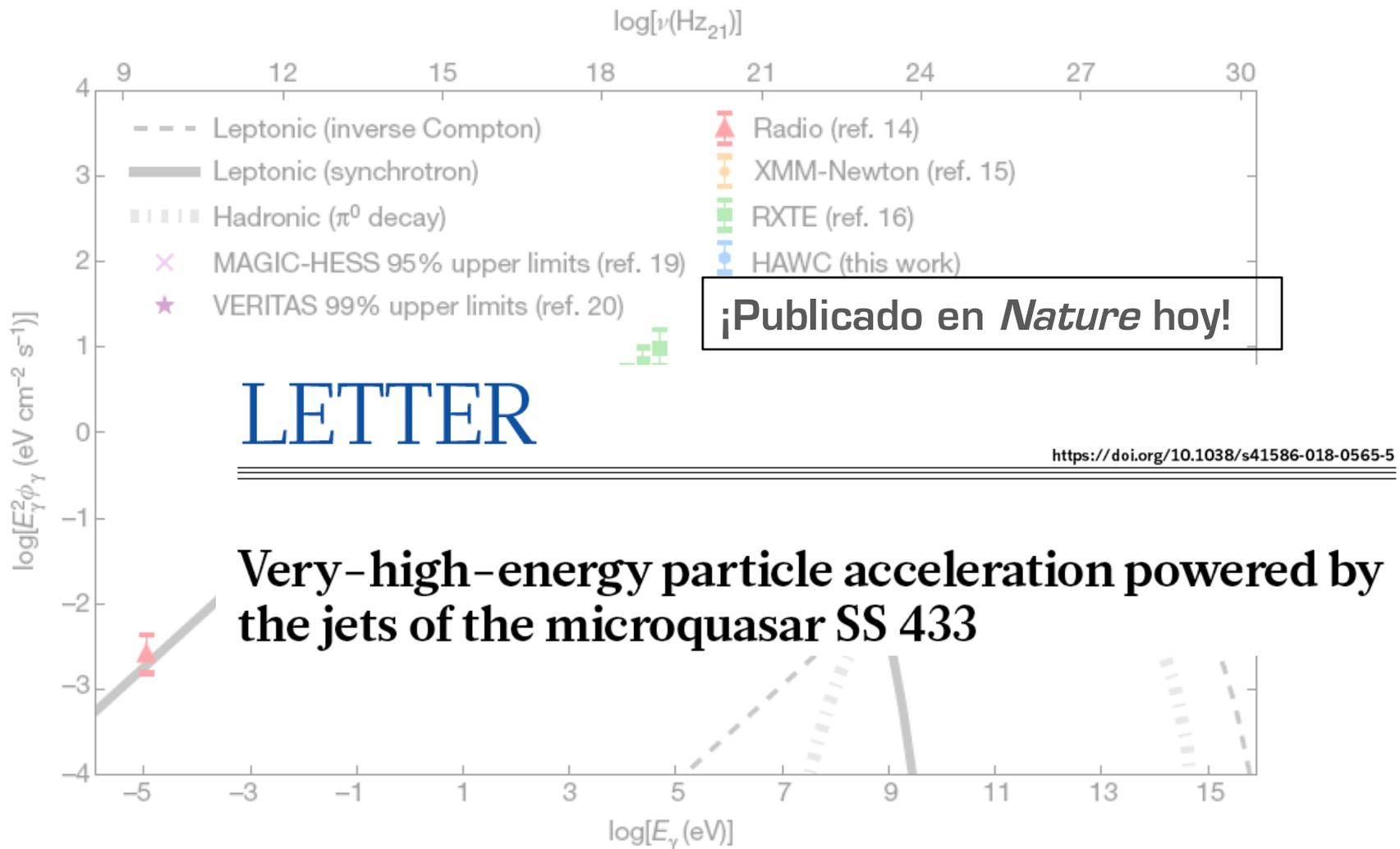
¡Primera vez que jets astrofísicos son medidos a estas energías! Las mediciones representan un reto para los modelos de aceleración existentes, electrones de por lo menos 100 TeV (los aceleradores terrestres son 10^3 menos poderosos)

SS 433 ¿Que produce los fotones?



Espectro en energía de la región e1. Los datos de HAWC dan por primera vez evidencia de que todo el espectro se debe principalmente a una misma población de electrones

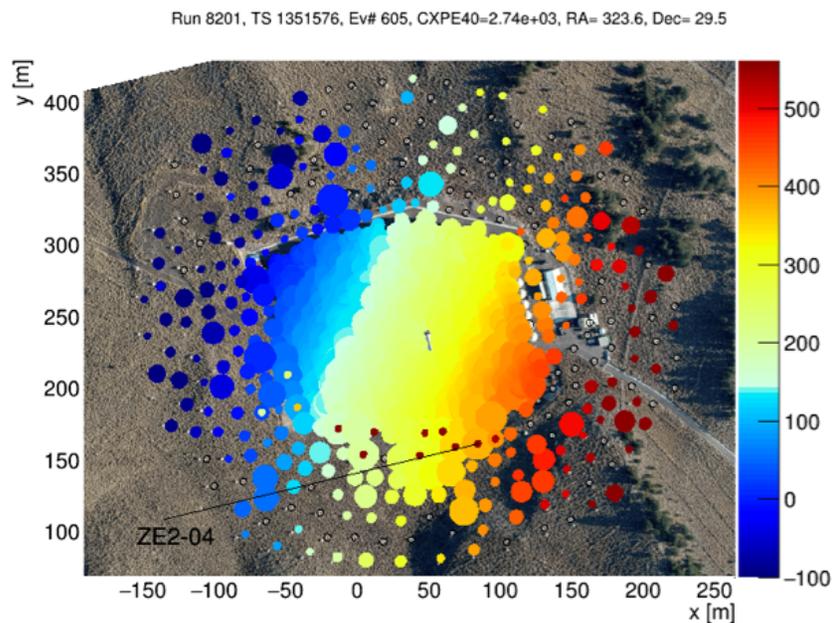
SS 433 ¿Que produce los fotones?



Espectro en energía de la región e1. Los datos de HAWC dan por primera vez evidencia de que todo el espectro se debe principalmente a una misma población de electrones

Primera mejora: *Outriggers*

- HAWC Sparse Outrigger Array:
 - Incrementa la sensibilidad por un factor de 3-4 para cascadas con energías > 10 TeV
 - Financiamiento de LANL/México/MPI Heidelberg.
- Formado por 350 tanques de 2500 litros: 1/80 del volumen de los detectores principales

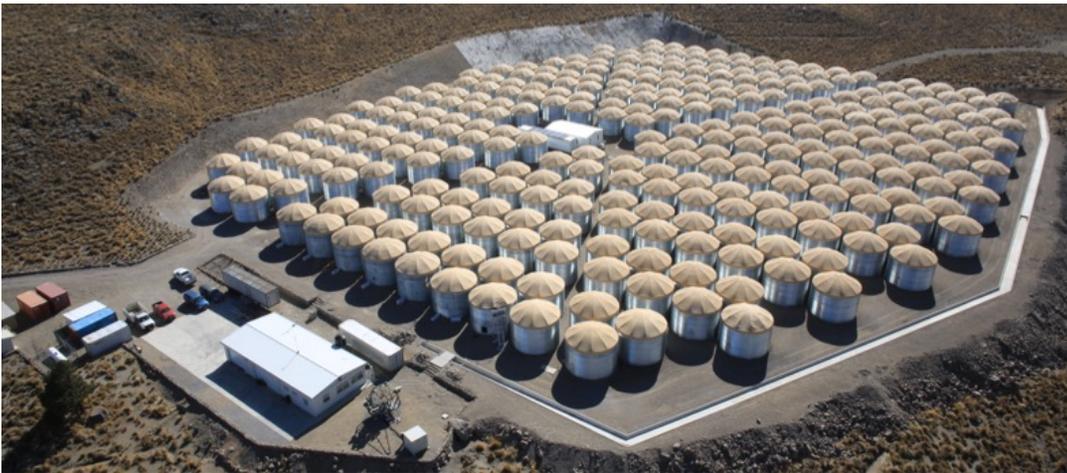


Adquisición de datos desde agosto pasado



¿Qué tan caro es HAWC?

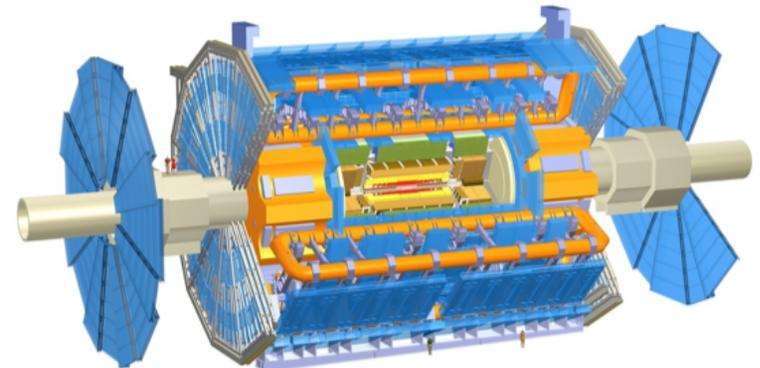
HAWC



Costó ~ 225 millones de pesos
de los cuáles México contribuyó con
1/3 del costo
~ 75 millones de pesos



LHC: ~ 100 000 millones de pesos



ATLAS: ~ 10 200 millones de pesos

Conclusiones

- El observatorio HAWC es el primer instrumento para estudiar ciencia de altas energías que es construido en México
- Aunque diseñado para hacer astrofísica de rayos gamma, es una excelente herramienta para estudiar rayos cósmicos
- HAWC ha permitido descartar una posible fuente del exceso de anti electrones: ¿materia oscura?
- Se han observado jets producidos por un sistema binario a energías de TeV por primera vez, desafío para modelos teóricos
- ¡Muchos resultados en preparación!