



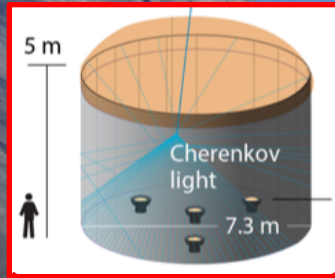
*Resultados del tercer año de  
operación de HAWC y avances en la  
detección de muones horizontales*

Hermes León Vargas  
Instituto de Física, UNAM

Seminario conjunto ICN - IF UNAM  
Instituto de Ciencias Nucleares  
7 de febrero de 2018

# El observatorio HAWC

Citlaltepetl  
Pico de Orizaba  
5636 m s.n.m.



# Datos producidos por HAWC



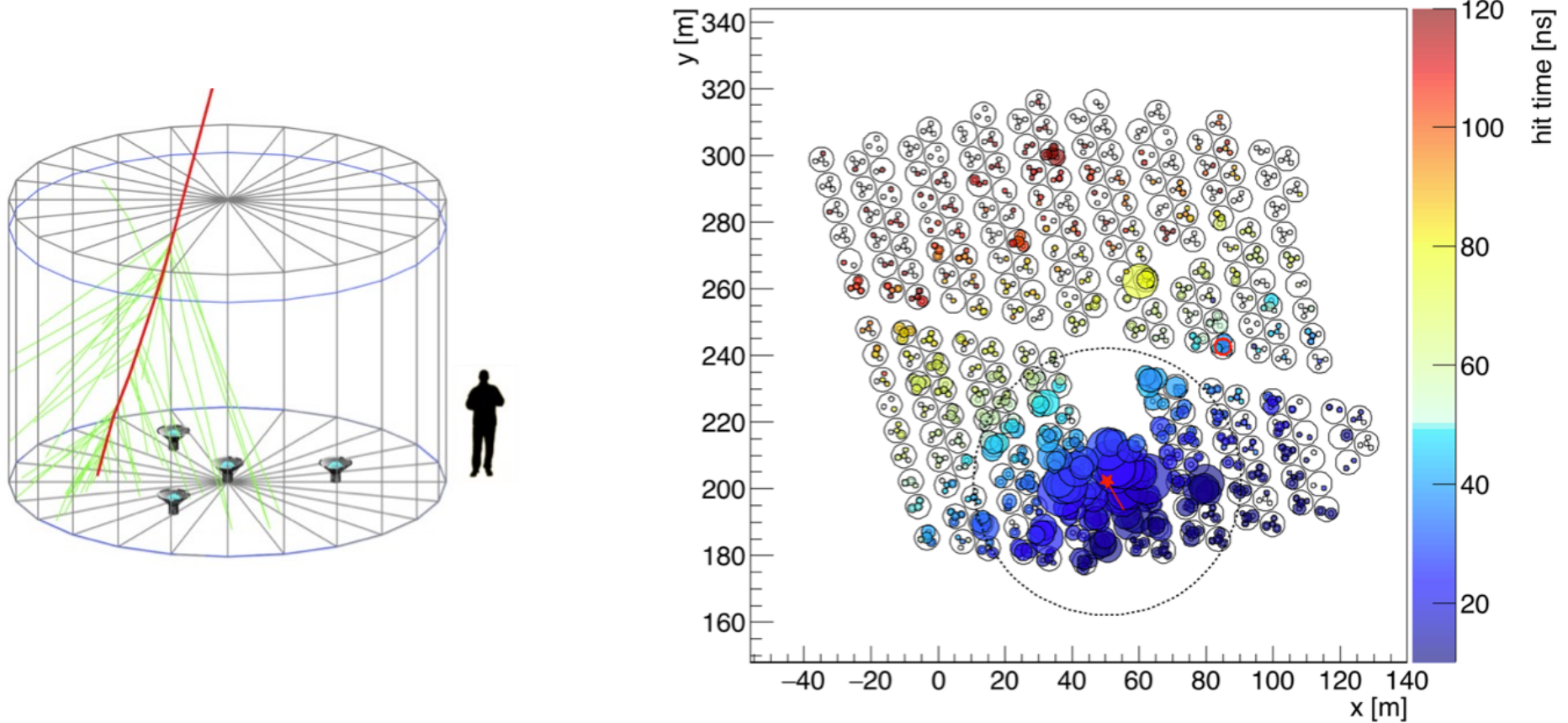
- HAWC tiene un *trigger rate* de  $\sim 24\text{kHz}$  de cascadas atmosféricas, principalmente del fondo de rayos cósmicos.
- Los datos producen  $\sim 20\text{MB/s}$   
→ 700 TB/año
- Se analizan y reconstruyen los datos en tiempo real ( $\sim 4$  seg.) con  $\sim 200$  núcleos.
- Conforme se mejora la reconstrucción/calibración, los datos se vuelven a procesar.
- Actualmente se trabaja en las mejoras de los algoritmos para realizar el *pass 5*.

Dos centros de almacenamiento y análisis:

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

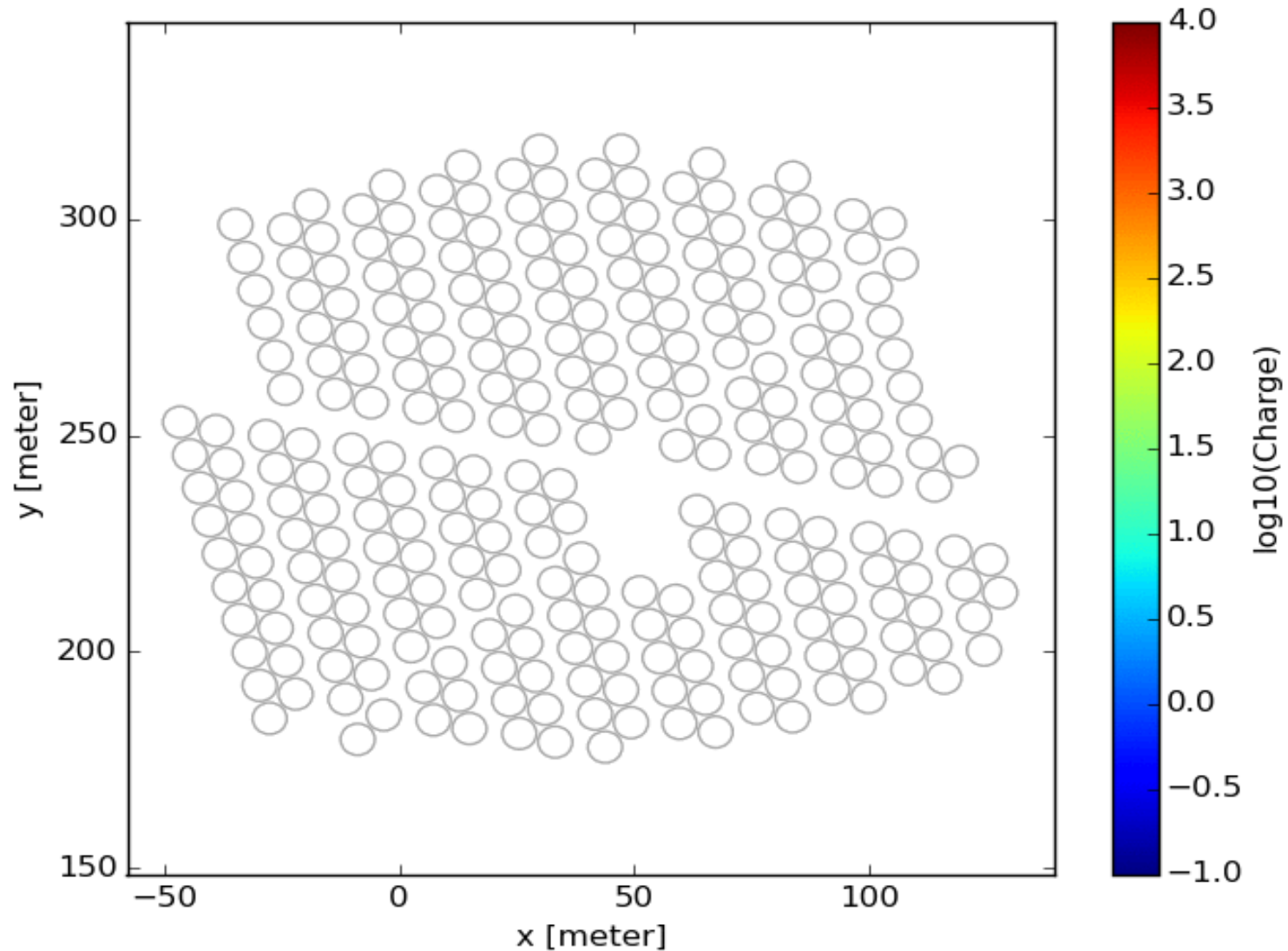
# Detección de cascadas atmosféricas

Run 2118, TS 45004, Ev# 41, CXPE40= 55.7, Cmptness= 10.7



Las partículas secundarias con carga eléctrica que forman la cascada atmosférica producen luz Cherenkov al atravesar los tanques de HAWC (WCDs)

# Propagación de una cascada en HAWC



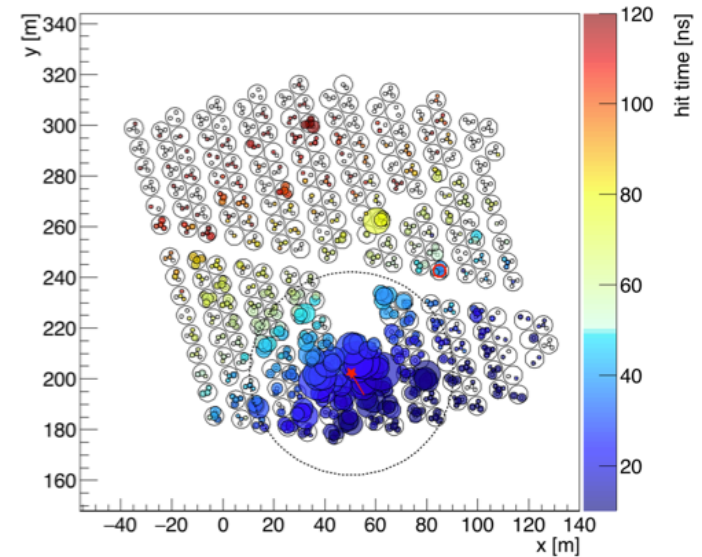
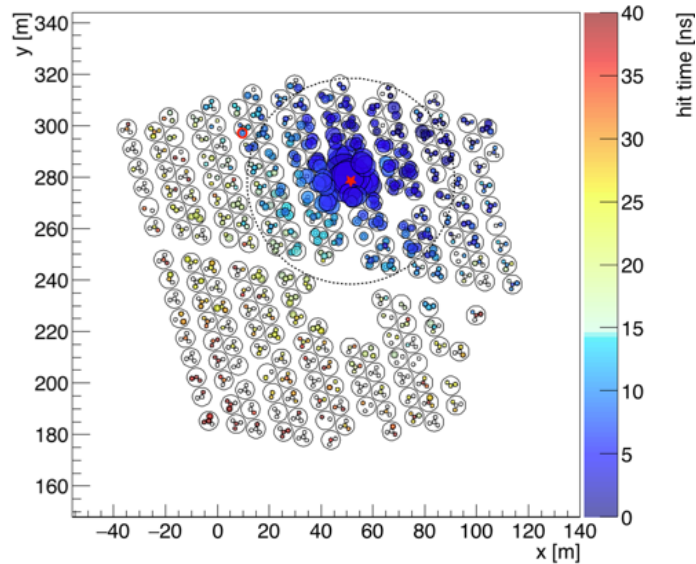
# Separación gamma/hadrón

Cascada atmosférica consistente con un rayo gamma producido en la nebulosa del Cangrejo

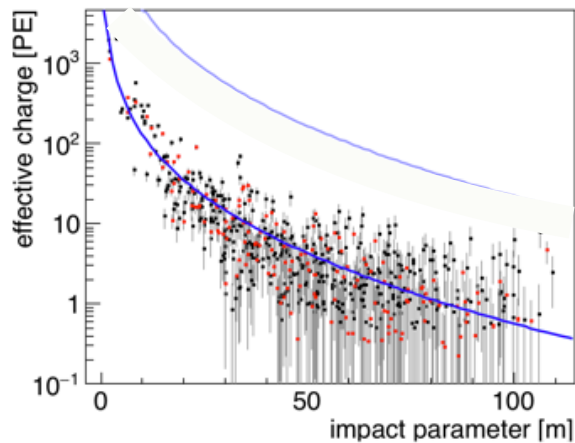
Cascada hadrónica

Run 2054, TS 584212, Ev# 226, CXPE40= 21.2, Cmptrness= 28.3

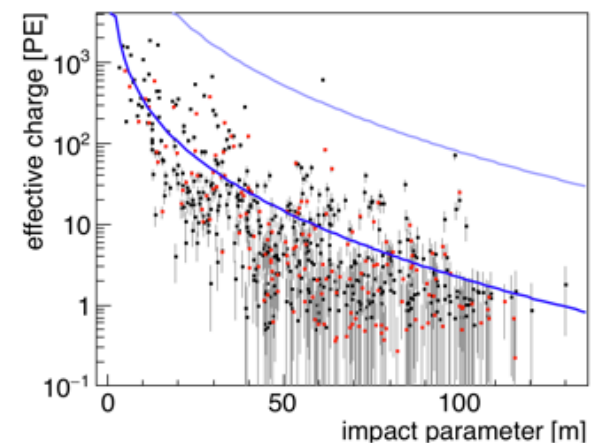
Run 2118, TS 45004, Ev# 41, CXPE40= 55.7, Cmptrness= 10.7



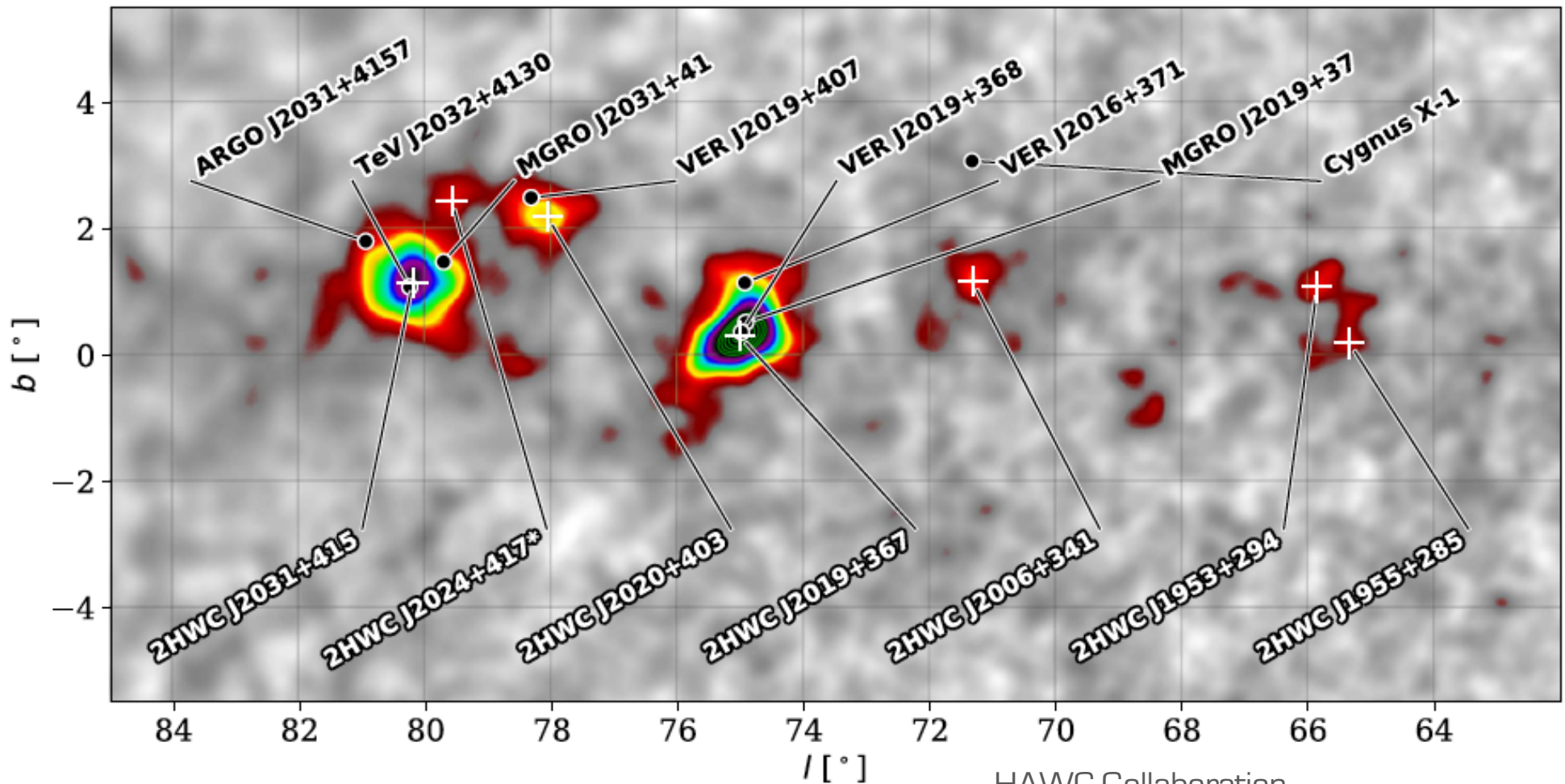
Lateral distribution



Lateral distribution



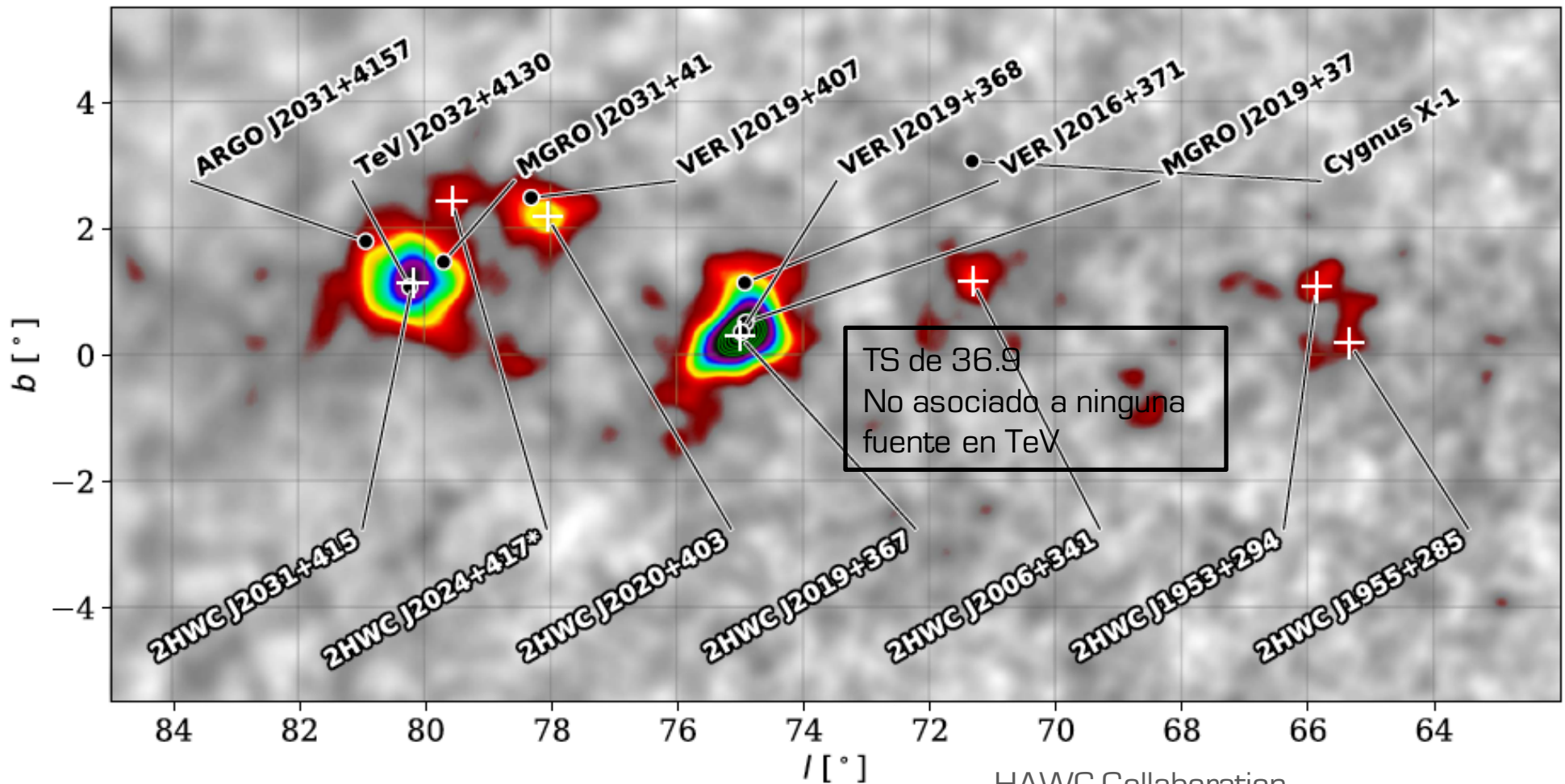
# Plano de la galaxia (una sección como ejemplo)



HAWC Collaboration  
The Astrophysical Journal 843:40 (2017)

En el segundo catálogo detectamos 39 fuentes de rayos gamma,  
**19 son nuevas** (no asociadas a fuentes en TeV conocidas)

# Plano de la galaxia (una sección como ejemplo)

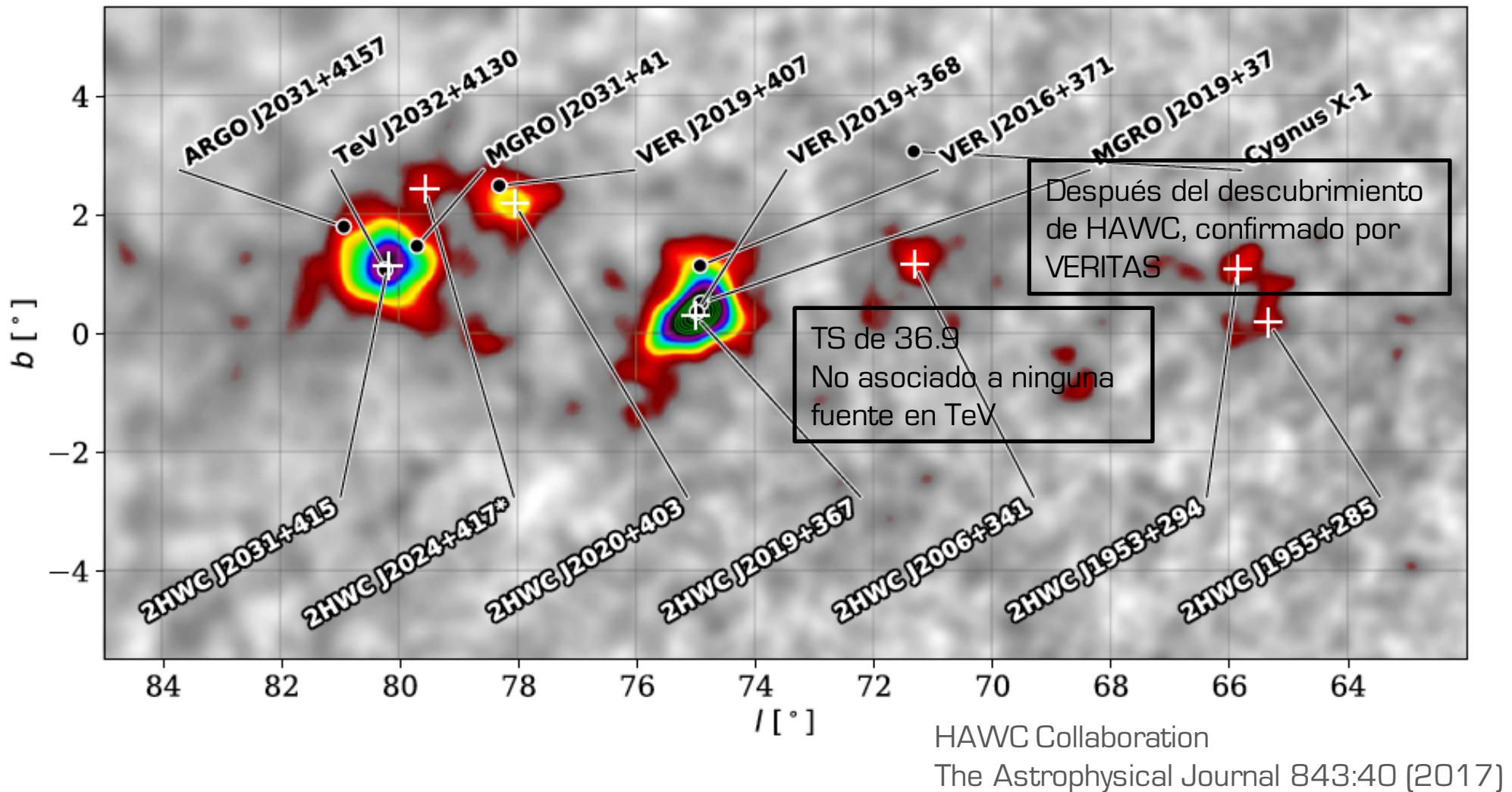


HAWC Collaboration  
The Astrophysical Journal 843:40 (2017)

En el segundo catálogo detectamos 39 fuentes de rayos gamma,  
**19 son nuevas** (no asociadas a fuentes en TeV conocidas)



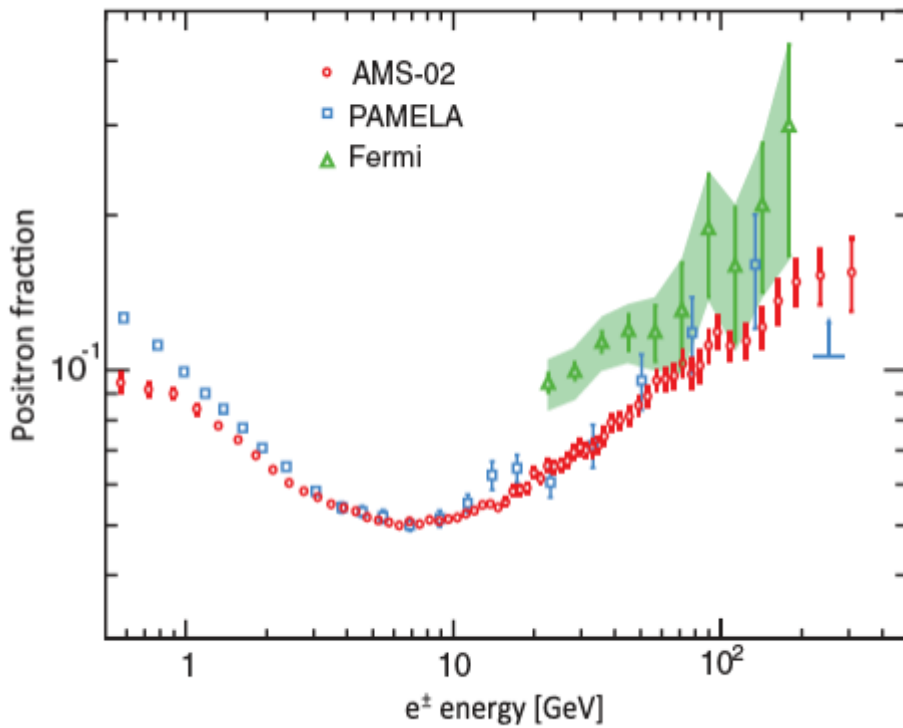
# Plano de la galaxia (una sección como ejemplo)



En el segundo catálogo detectamos 39 fuentes de rayos gamma,  
**19 son nuevas** (no asociadas a fuentes en TeV conocidas)

# Sobre el misterioso exceso de positrones

- Como les mostré, hemos encontrado fuentes de rayos gamma que no habían sido reportadas anteriormente



AMS Collaboration  
PRL 110, 141102 (2013)

PAMELA y AMS han medido un exceso de positrones con energías  $> 10$  GeV

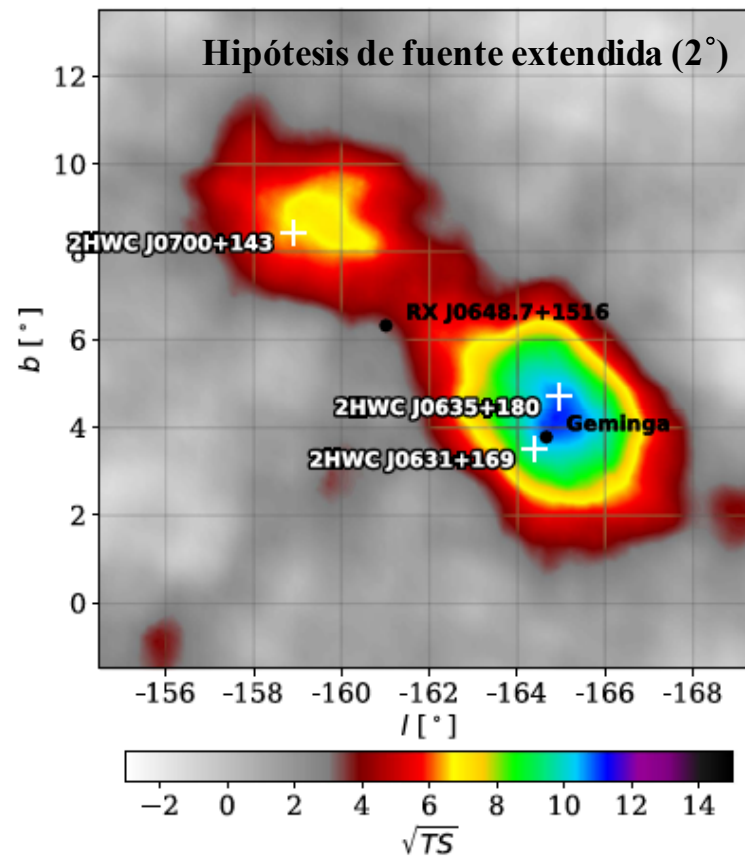
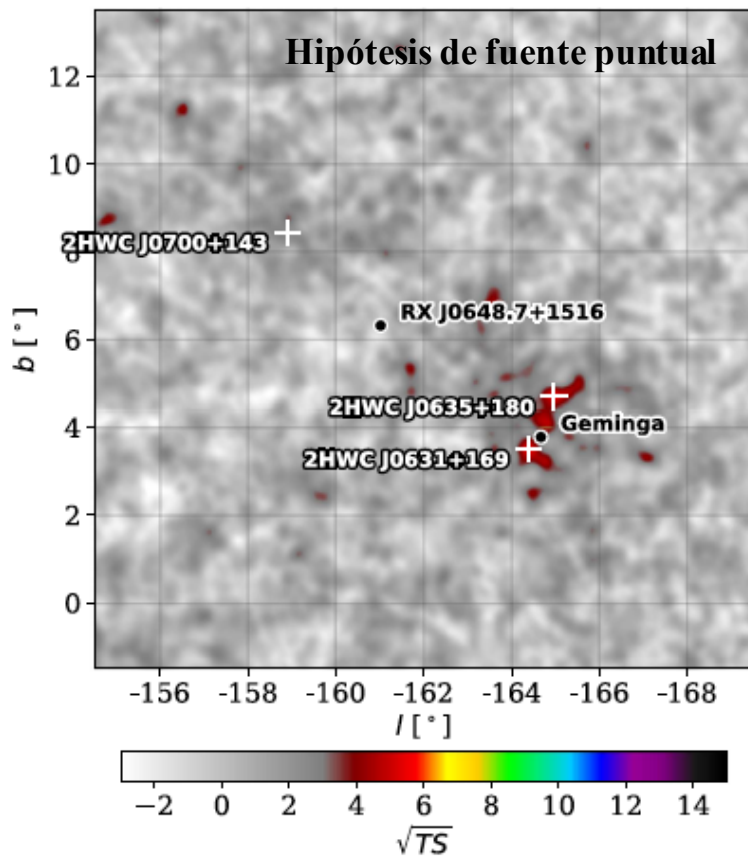
¿Es posible que este exceso se deba a un pulsar cercano en lugar de que sea producto de la aniquilación de materia oscura?

Requisitos para la hipótesis de los pulsares:

- Debe ser lo suficientemente viejo de manera que podamos estar recibiendo actualmente su viento de  $e^+e^-$
- También debe ser lo suficientemente joven de manera que siga emitiendo este viento

# Sobre el misterioso exceso de positrones

Geminga (edad de  $3 \times 10^5$  años, distancia de 250 pc) y PSR B056+14 (edad de  $1 \times 10^5$  años, distancia de 288 pc) son candidatos para ser la posible fuente de positrones. HAWC es el único instrumento capaz de caracterizar a estas fuentes extendidas.



HAWC Collaboration  
The Astrophysical  
Journal  
843:40 (2017)

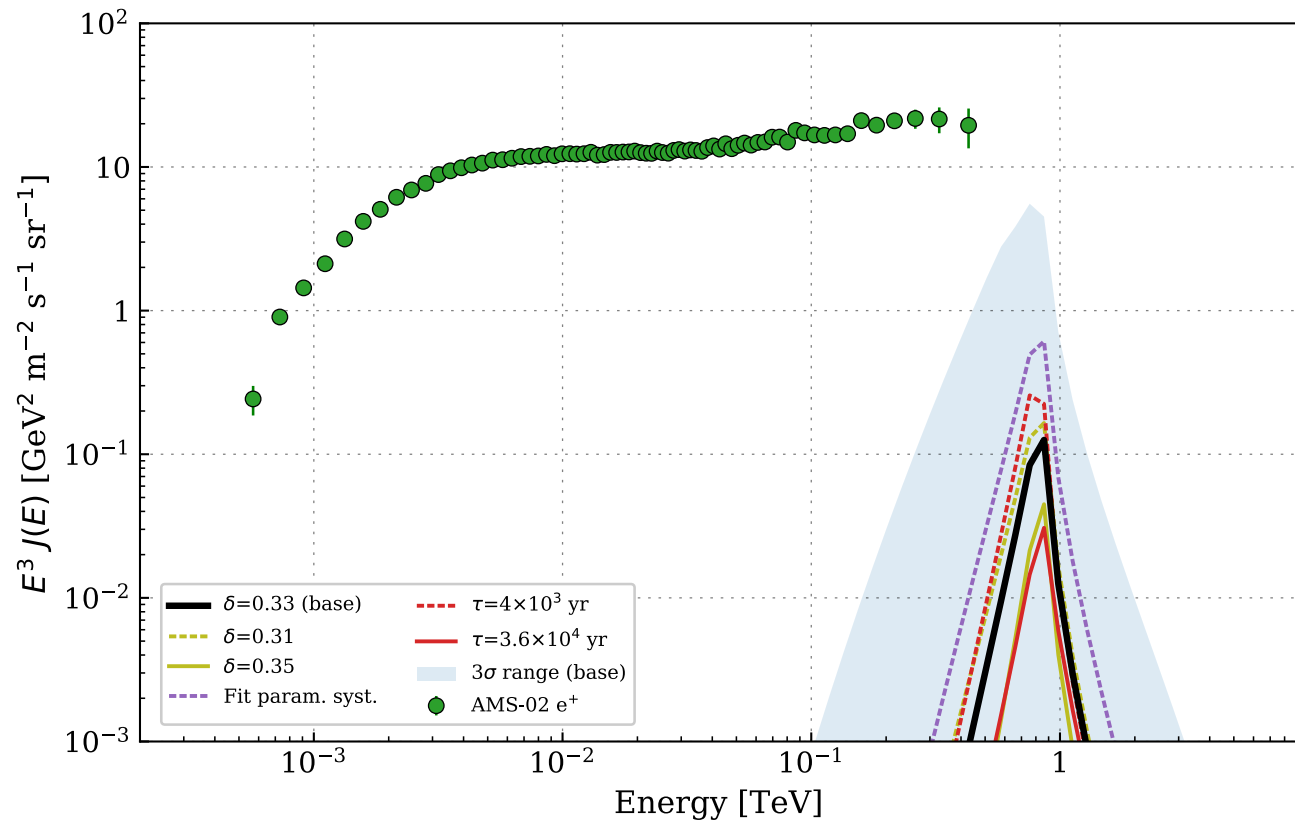
Antes de HAWC, Milagro fue el único observatorio capaz de detectar a Geminga en TeV, 2HWC J0700+143 es una nueva fuente descubierta por HAWC que tiene un pulsar similar a Geminga.

# Sobre el misterioso exceso de positrones

La emisión en rayos gamma de estas fuentes es producida por la difusión de leptones en el ISM y por su dispersión inversa de Compton en el fondo de micro ondas. En base a las propiedades medidas por HAWC, se pueden inferir las propiedades de propagación de los  $e^+$  hacia la Tierra.

Contribución de Geminga, la de la otra fuente es despreciable

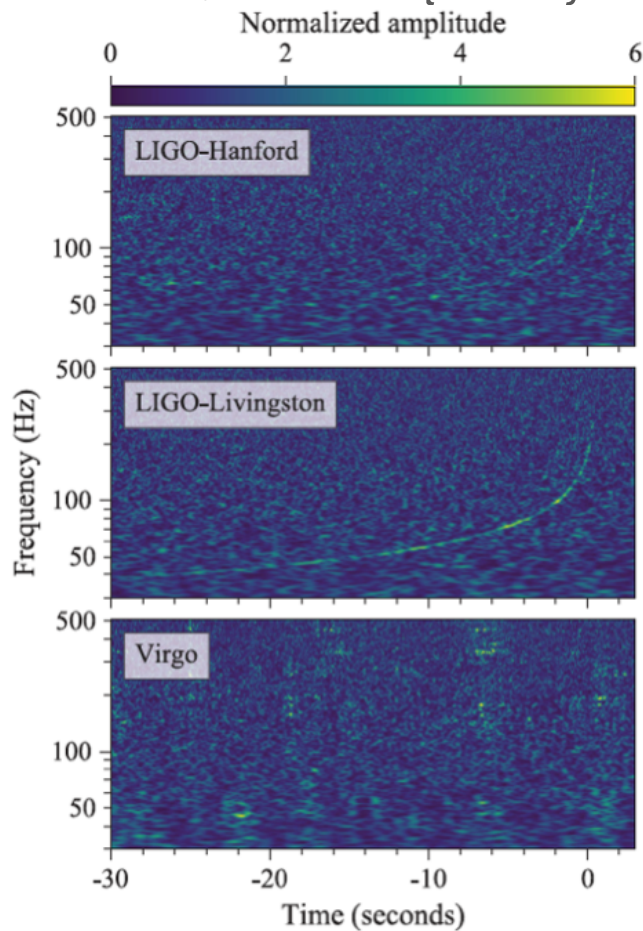
HAWC Collaboration  
Science **358**  
911-914 (2017)



El flujo de positrones no puede ser explicado por las contribuciones de Geminga y 2HWC J0700+143

# Colisión de estrellas de neutrones

Colaboraciones LIGO & Virgo  
PRL 119, 161101 (2017)

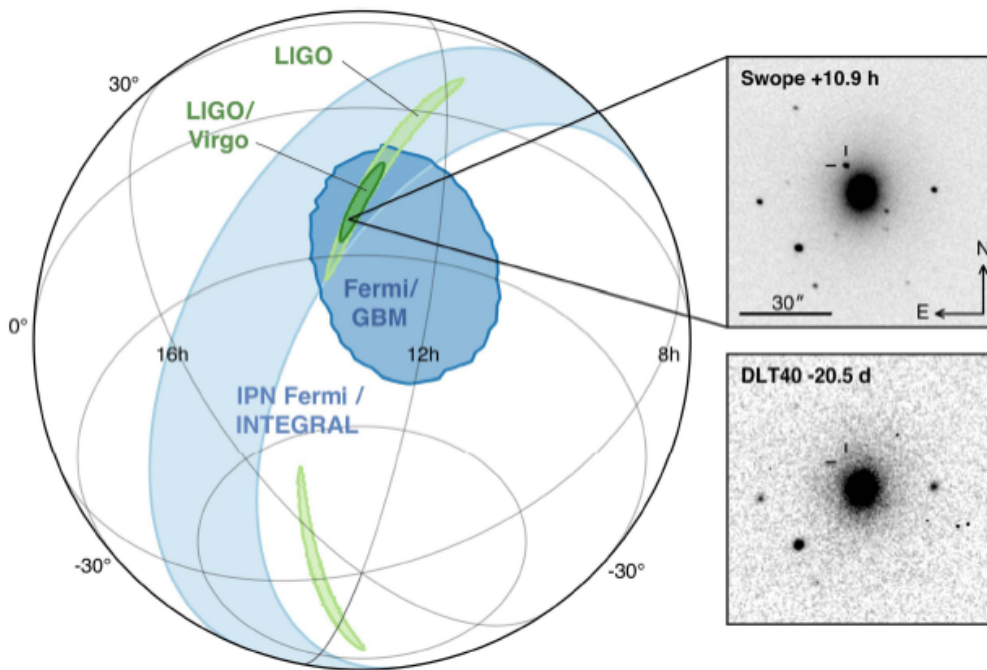


- Primera observación de la colisión de un sistema binario de estrellas de neutrones asociada a un destello de rayos gamma (GRB) detectado por Fermi-GBM
- Primera evidencia directa de la asociación entre colisiones de objetos compactos y GRBs

Agosto 17, 2017  
12:41:04 UTC

# Observaciones en múltiples longitudes de onda y mensajeros de la colisión

Al descubrir la señal, se dio un seguimiento por parte de 60 colaboraciones alrededor del mundo, incluyendo a HAWC



*APJ Letters 848:L12 (2017)*

- La región donde ocurrió el evento no se encontraba en el campo de visión de HAWC
- Esta transitó 9 horas después, pero con una elevación desfavorable para HAWC ( $42^\circ$ )
- Con HAWC se obtuvieron límites superiores del flujo de fotones con energías  $> 40$  TeV asumiendo un espectro  $E^{-2.5}$  que fueron reportadas en una circular GCN (*Gamma-ray Coordinates Network*).

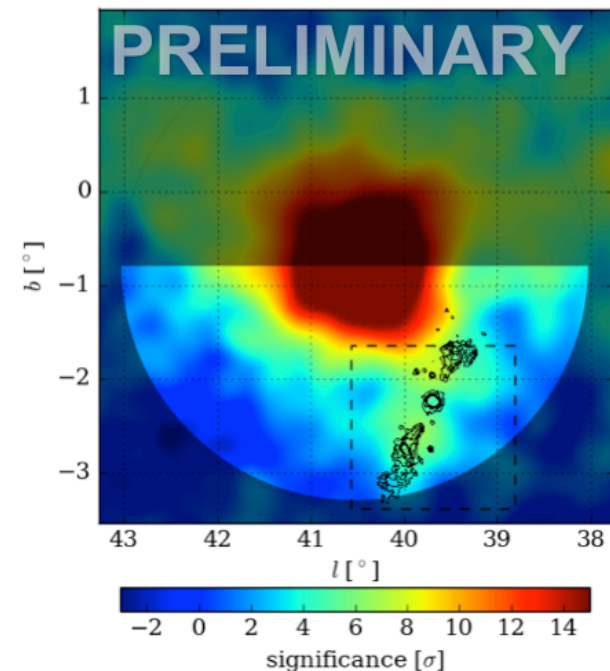
# SS 433



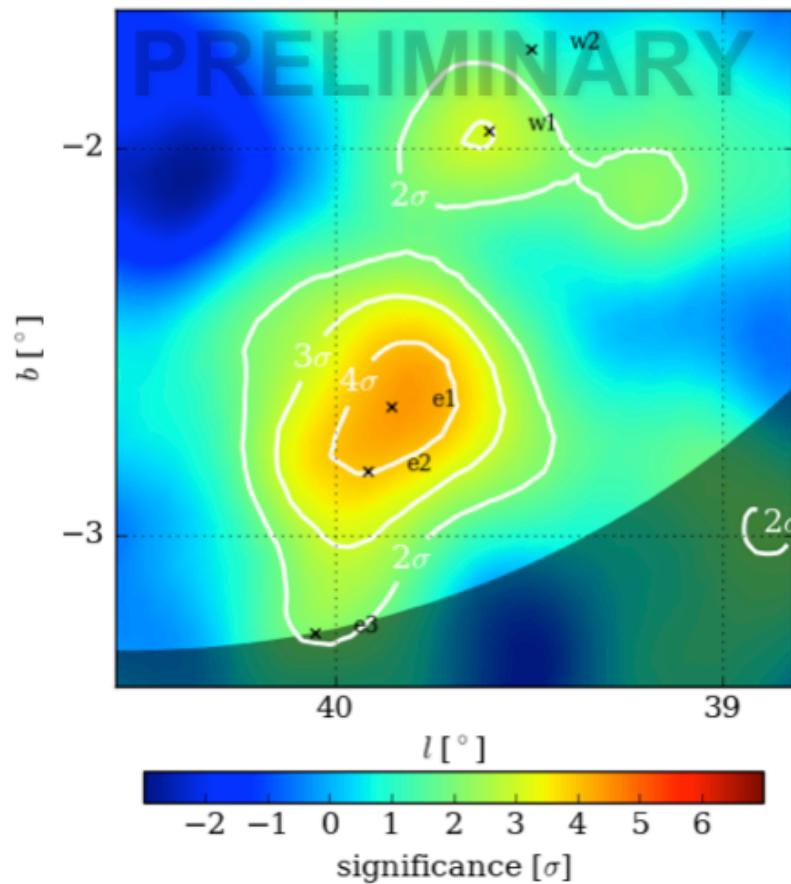
Se trata de un sistema binario compuesto por un agujero negro ( $\sim 9 M_{\text{Sol}}$ ) acompañado por una estrella ( $\sim 30\text{-}40 M_{\text{Sol}}$ ) que da materia al disco de acreción. Esto produce los jets más poderosos de la Vía Láctea.

NASA

El mapa de HAWC muestra a la fuente MGRO J1908+06 y a SS 433 utilizando 30 meses de datos. Los contornos muestran la detección en rayos X de SS 433 y los jets.



# SS 433



Acercamiento a SS 433, después de substrair a MGRO J1908+06. Los contornos indican la emisión en radio.

La significancia de los 2 lóbulos es menor a  $5\sigma$  de manera individual, pero haciendo el ajuste de manera conjunta se obtiene  $6\sigma$

¡Descubrimiento de jets a energías de TeVs!

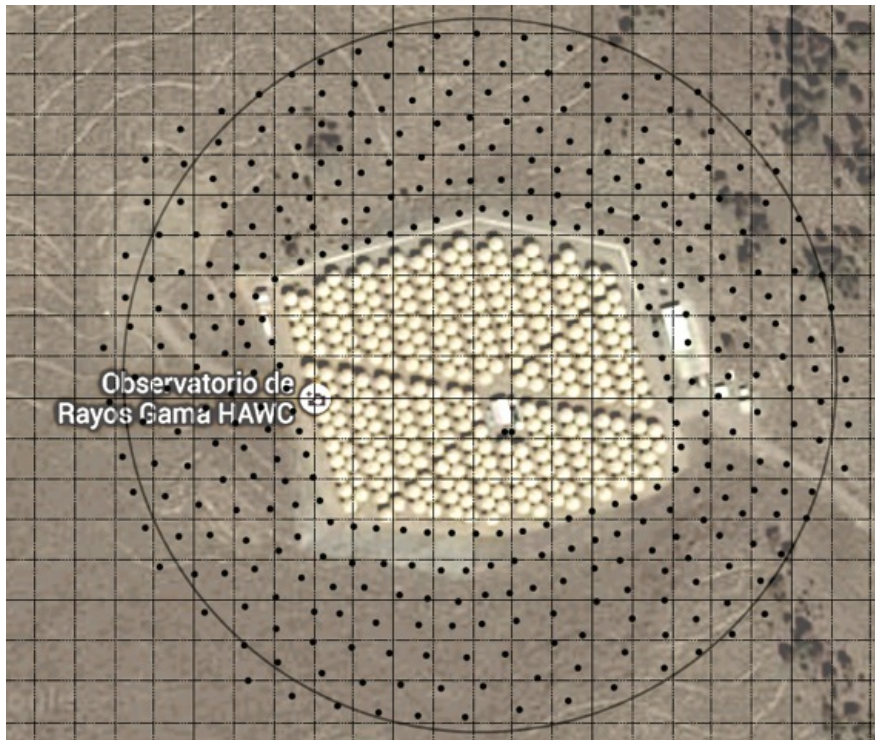
Los jets no habían sido observados antes probablemente debido a su tamaño angular. No se observa emisión en la posición del sistema binario central.

Combinando las mediciones de HAWC con otras longitudes de onda se pueden inferir propiedades del sistema como el campo magnético y el mecanismo de origen de los rayos gamma.



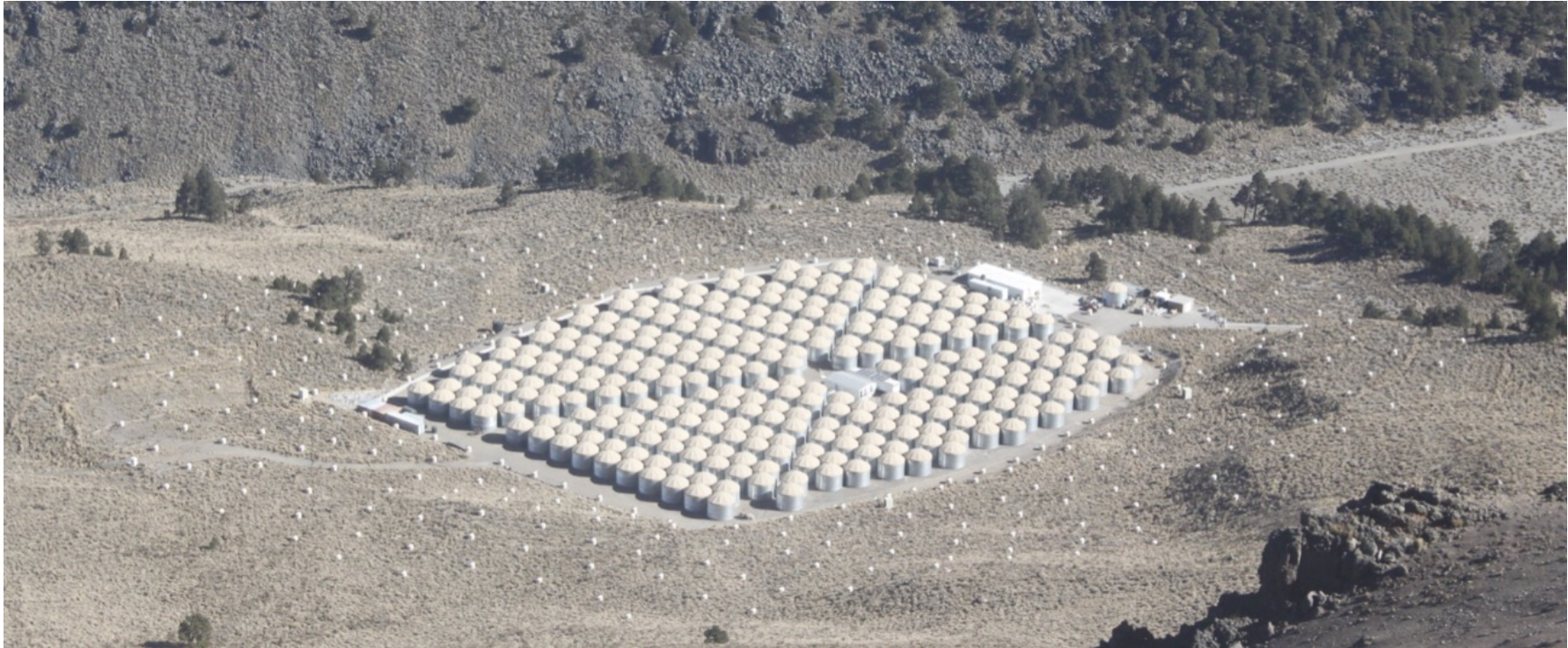
# Primer upgrade: Outriggers

- HAWC Sparse Outrigger Array:
  - Incrementar la sensibilidad para cascadas con energías  $> 10$  TeV
  - Determinación precisa de la localización del núcleo para cascadas con núcleos alejados del arreglo
  - Incremento del área efectiva para energías  $> 10$  TeV por 3-4x (HAWC es el instrumento más sensible en este rango)
- Financiado por LANL/México.
- 350 Tanques de 2500 litros:  $1/70$  del volumen de los tanques de HAWC



# Primer upgrade: Outriggers

El último tanque se instaló en su posición final el 23 de enero pasado

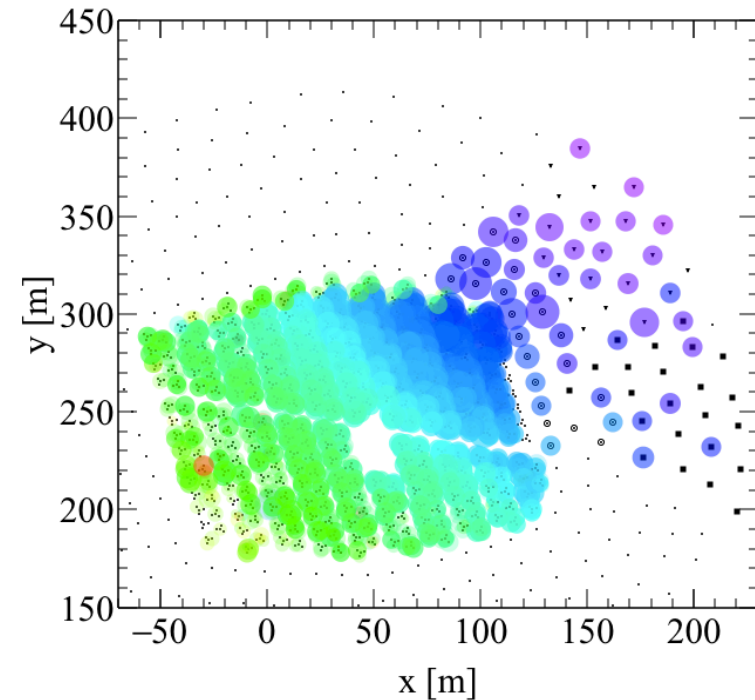
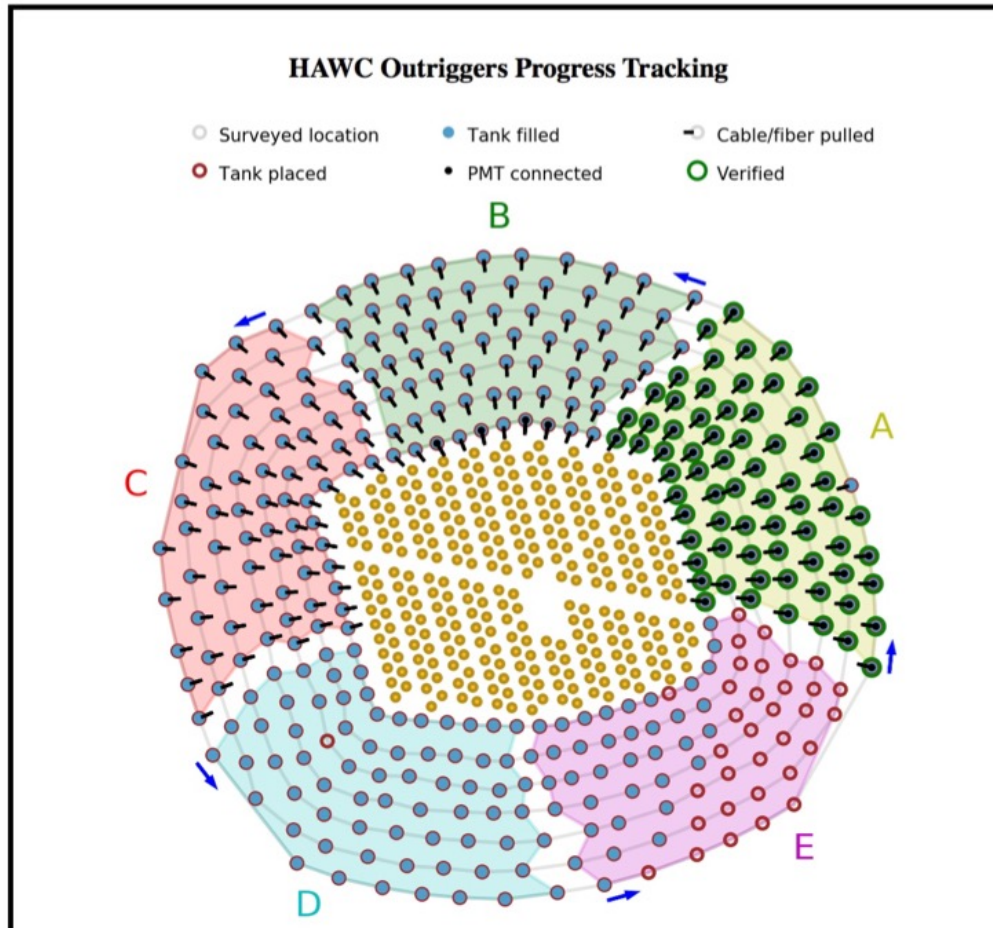


Superficie cubierta por el arreglo principal: 22 000 m<sup>2</sup>

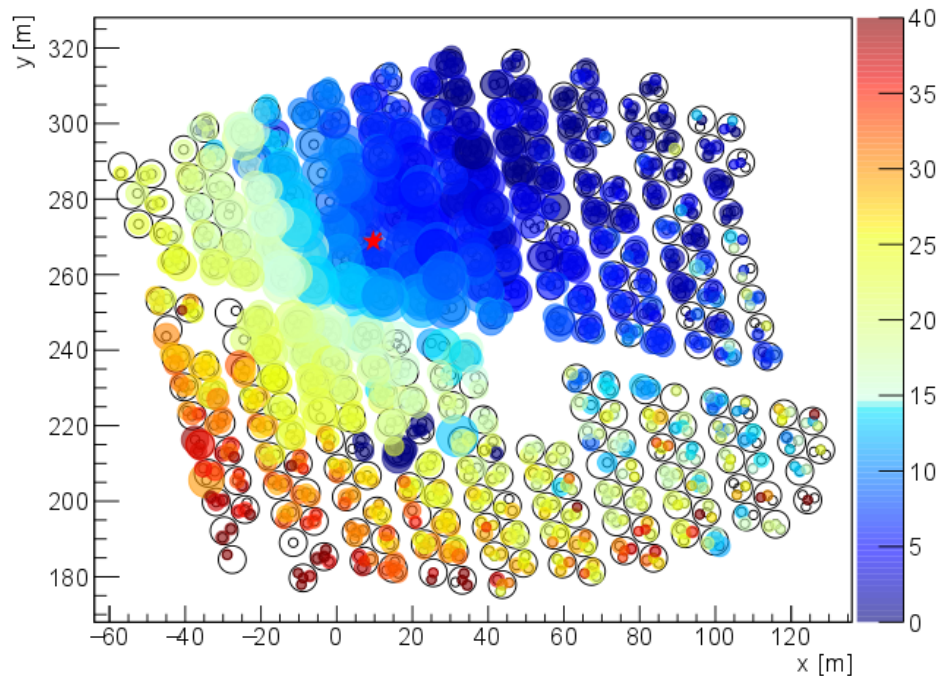
Superficie total cubierta con los outriggers: 1 00 000 m<sup>2</sup>

# Primer upgrade: Outriggers

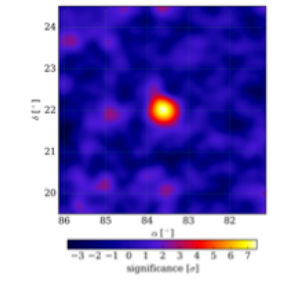
Estatus actual del progreso en instalación: 20% instrumentado



# Primer upgrade: Outriggers, ¿para qué servirán?



hit time [ns]



Evento que pasa los cortes para ser consistente con un fotón de  $\sim 60$  TeV proveniente del Cangrejo

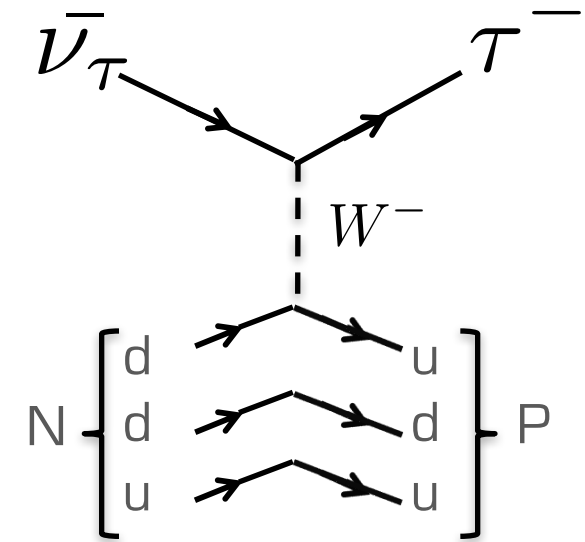
Mapa del Cangrejo para energías superiores a  $\sim 65$  TeV

Con los *outriggers* mejoraremos la sensibilidad por un factor de 4

# Motivación del estudio de muones horizontales: Detección indirecta de neutrinos

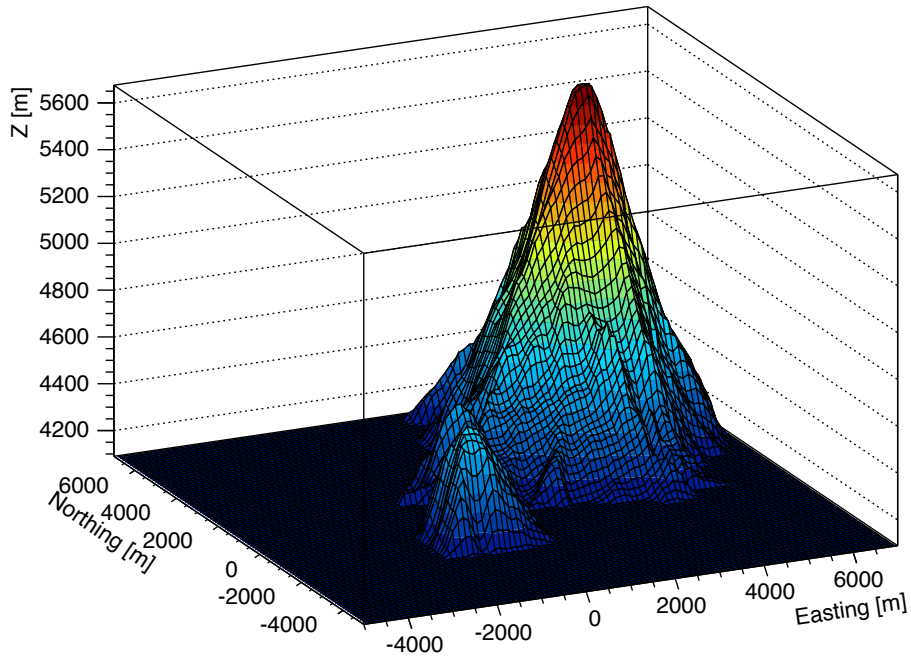


PRL 88, 161102 (2002)  
J. Feng et al.

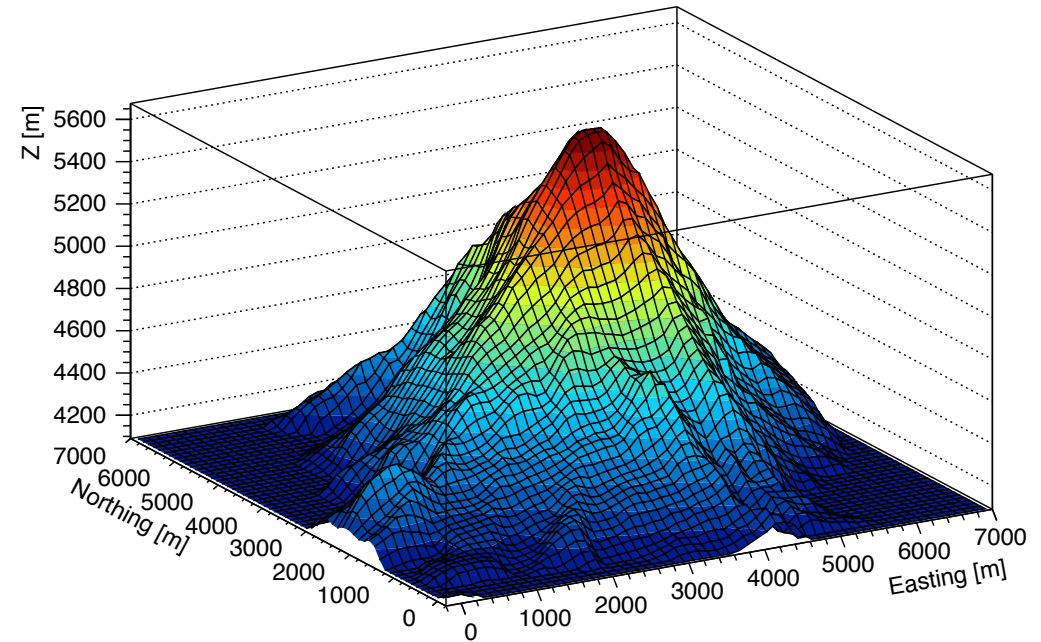


- Se buscan en neutrinos tau debido a sus propiedades
- La montaña funciona como un filtro para cascadas atmosféricas
- Primer paso: Caracterizar las señales de ruido → Trazas de leptones cargados de alta energía

# Topografía del Pico de Orizaba



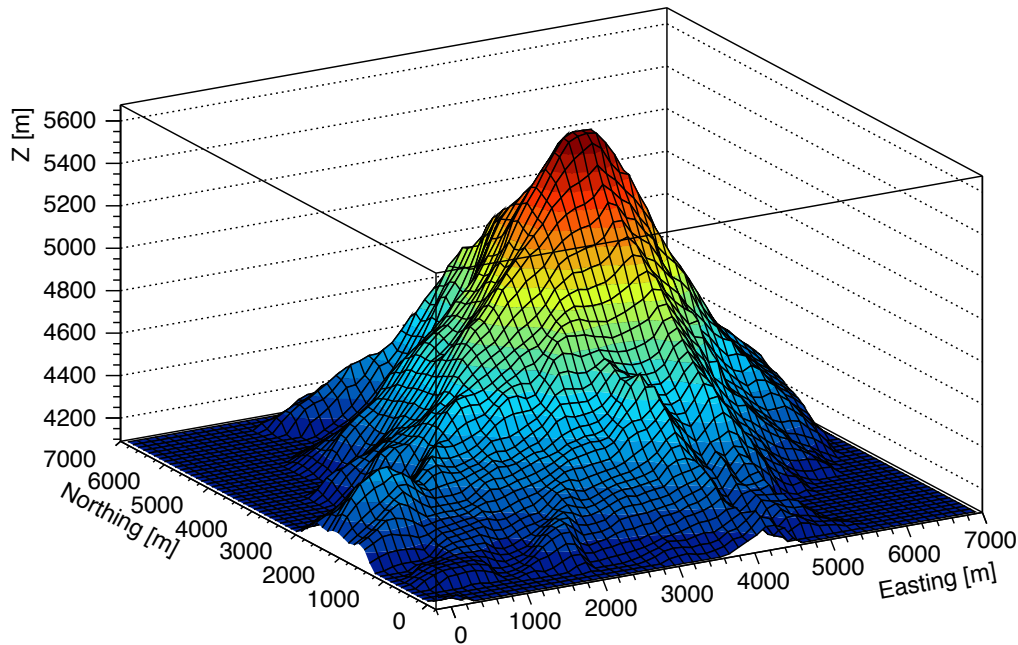
Topografía alrededor de HAWC a 4090 m



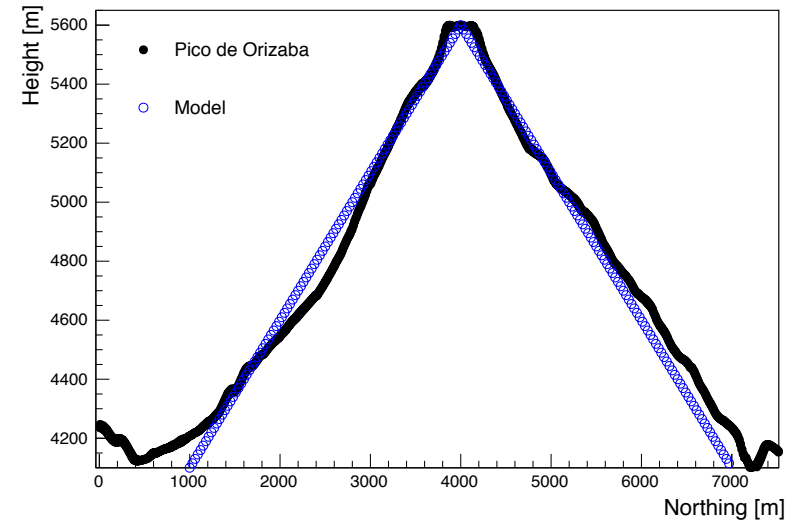
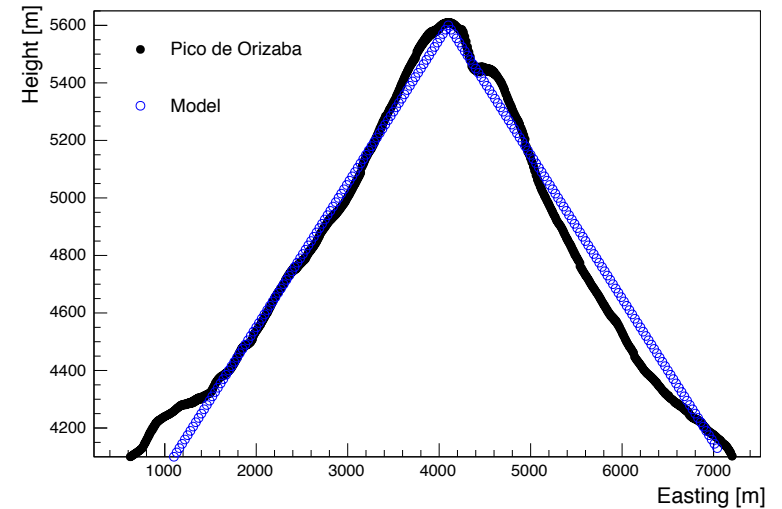
Vista del Pico de Orizaba desde el centro de HAWC

Una aproximación sencilla a la geometría real es un cono

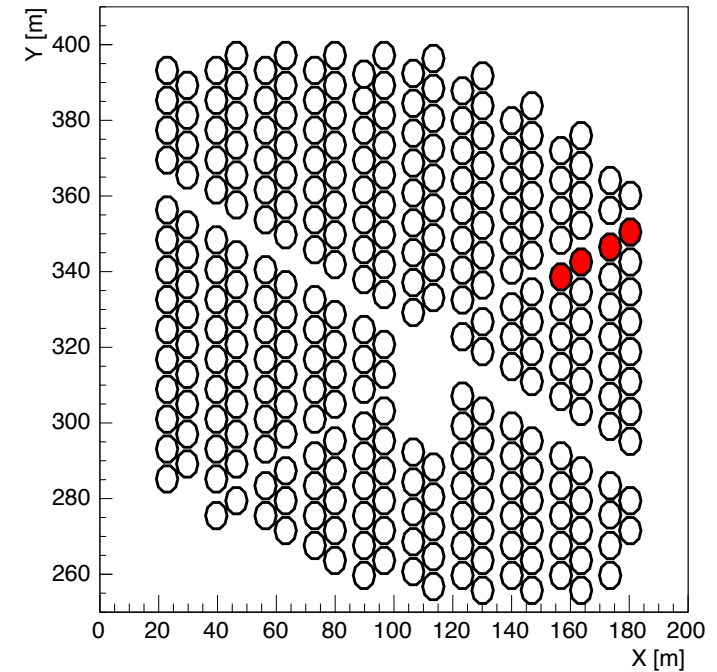
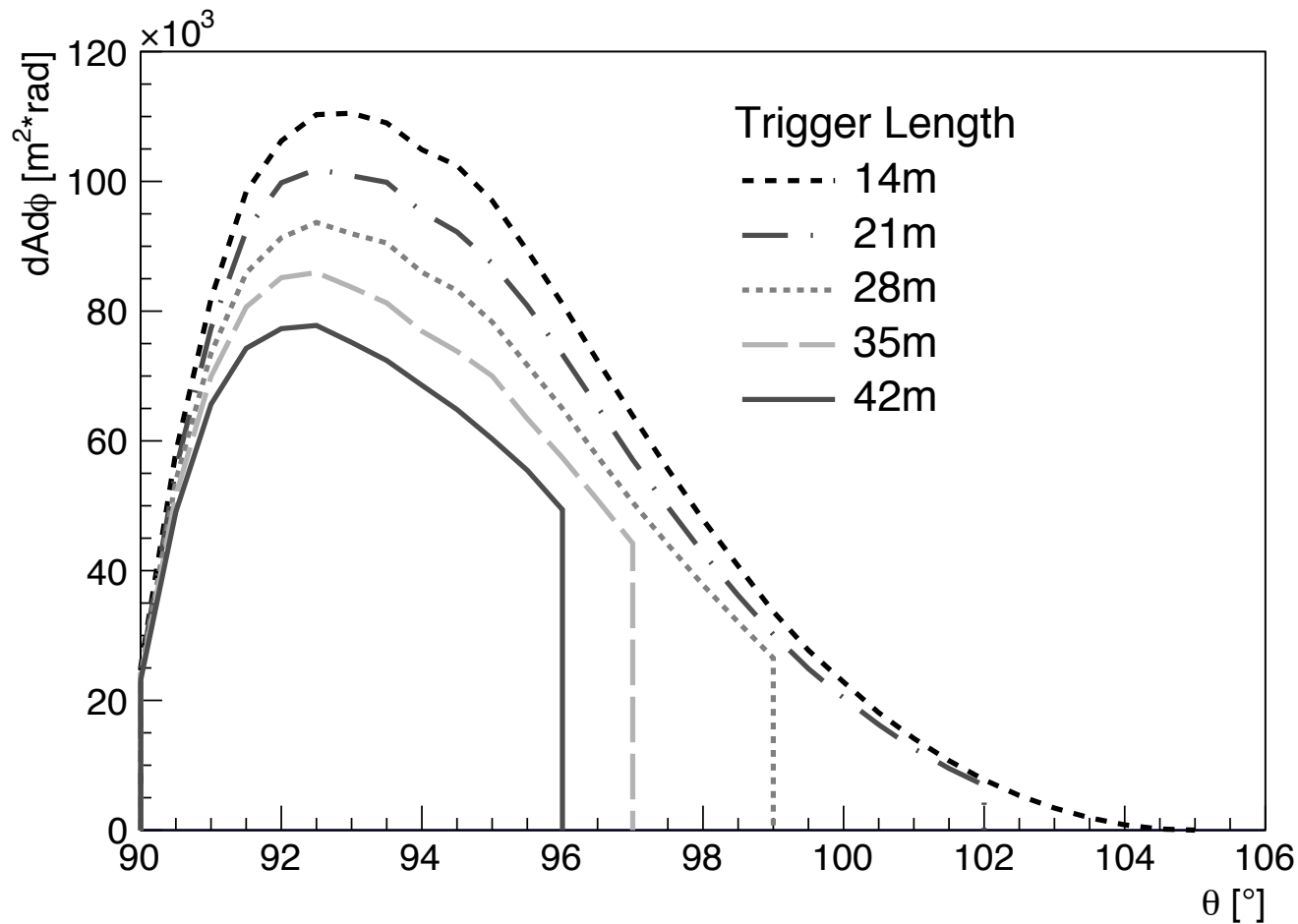
# Topografía del Pico de Orizaba



Vista del Pico de Orizaba, con origen en el centro del observatorio.



# Cálculo del área efectiva



Trigger: 28 m en x-y

$$f(\theta_i) = dAd\phi(\theta_i) \quad (A\Omega)_{\text{eff}} = \int_{\theta_j}^{\theta_f} f(\theta_i) d\theta$$

$$N_L = \Phi_L (A\Omega)_{\text{eff}} TD$$



# Artículo sobre el método y perspectivas de detección

Research Article

## Capability of the HAWC Gamma-Ray Observatory for the Indirect Detection of Ultrahigh-Energy Neutrinos

H. León Vargas et al.

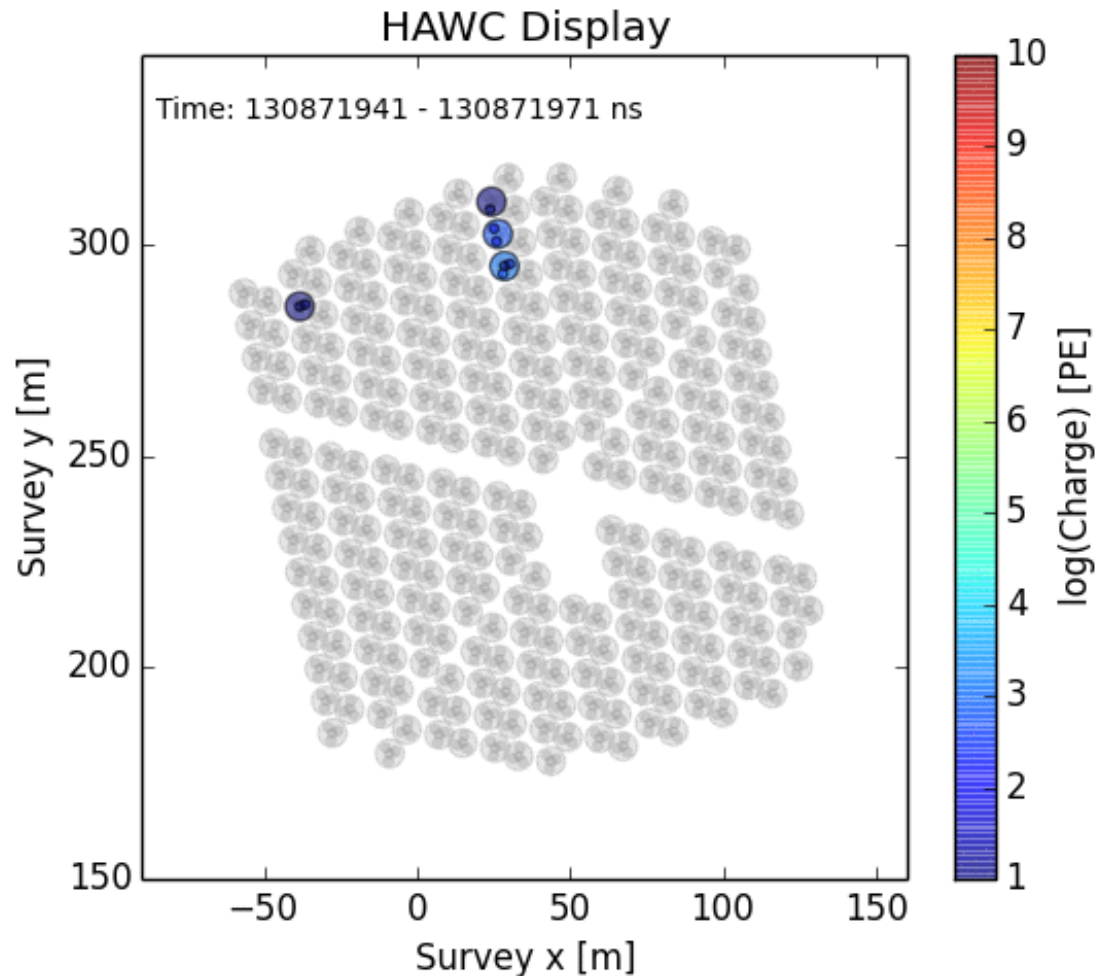
Julio 2017

Hindawi  
Advances in Astronomy  
Volume 2017, Article ID 1932413, 13 pages  
<https://doi.org/10.1155/2017/1932413>

Neutrino energy [ $E_\nu$ ]	Trigger [m]	$N: IC$	$N: \Phi_A$	$N: \Phi_B$	$N: \Phi_C$	$N: IC + \Phi_A + \Phi_C$	Bckg	$\Delta T$ IC [yr]	$\Delta T$ IC + $\Phi_A + \Phi_C$ [yr]
10 PeV–100 PeV	$\geq 14$	0.1416	0.0063	0.0109	0.0014	0.1492	0.0145	7.1	6.7
	$\geq 21$	0.1281	0.0057	0.0099	0.0012	0.1349	0.0131	7.8	7.4
	$\geq 28$	0.1080	0.0048	0.0083	0.0010	0.1138	0.0111	9.3	8.8
	$\geq 35$	0.0860	0.0038	0.0066	0.0008	0.0906	0.0088	11.6	11.0
	$\geq 42$	0.0693	0.0031	0.0054	0.0007	0.0730	0.0071	14.4	13.7
100 PeV–100 EeV	$\geq 14$	0.1454	0.0003	0.0056	0.0049	0.1505	$<10^{-5}$	6.9	6.6
	$\geq 21$	0.1315	0.0003	0.0050	0.0044	0.1321	$<10^{-5}$	7.6	7.6
	$\geq 28$	0.1109	0.0003	0.0042	0.0037	0.1148	$<10^{-5}$	9.0	8.7
	$\geq 35$	0.0882	0.0002	0.0034	0.0030	0.0914	$<10^{-5}$	11.3	10.9
	$\geq 42$	0.0711	0.0002	0.0027	0.0023	0.0736	$<10^{-5}$	14.1	13.6

Para medir un leptón cargado de mas de 10 PeV tomaría en principio alrededor de 5 años de observación.

# Paso de muones horizontales por HAWC

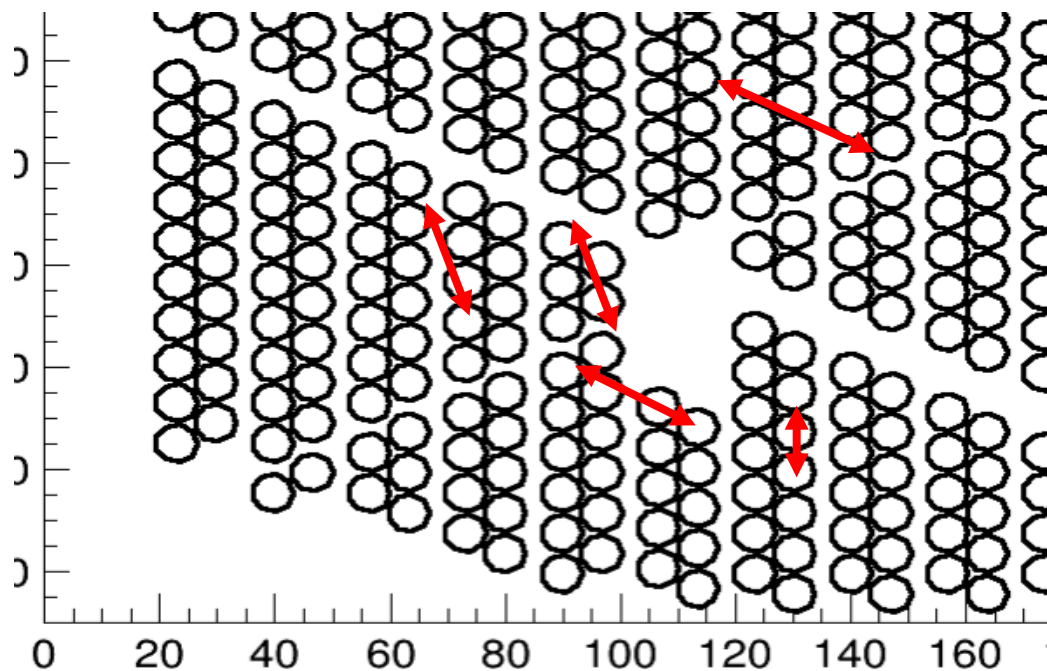


Nuestro interés es buscar señales de leptones cargados con trayectorias cuasi horizontales → Necesario desarrollar nuevos algoritmos para la búsqueda y caracterización de estas señales

# Usando a HAWC como detector de rastreo

Criterio de selección para sub-eventos:

- Seleccionar cadenas de hits en PMTs vecinos (columnas adyacentes o en la misma columna), que comprendan por lo menos 2 tanques, con propagación consistente con la velocidad de la luz
- Guardar información por tanque [ $\langle T \rangle$ ,  $\Sigma Pe$ , NHits] → pixel del detector de rastreo



# Procesamiento de los datos

## Análisis estándar en HAWC

### Datos del *trigger*:

- Correr **offline-reconstructor** (de manera centralizada)



- Producir mapas en base a cortes de selección, extraer significancias, flujos, variabilidad

## Análisis de muones horizontales

### Datos del trigger:

- Correr **offline-reconstructor** desactivando funcionalidades:
  - pinccness 0
  - extended
  - no-neural-net-energy
  - no-lh-energy
  - no-features-nn

Activar información extendida

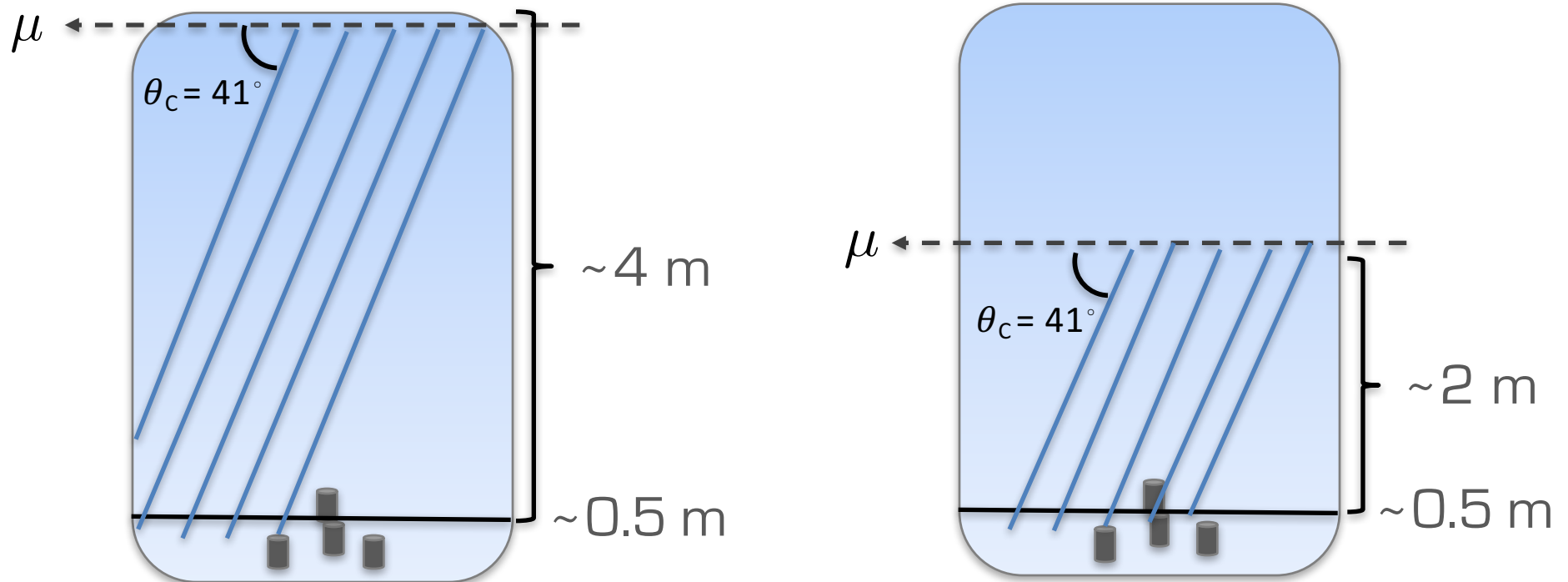


- Generar información por tanque: carga, tiempo, número de hits  
**(TankSelector)** ← “Trigger”
- Búsqueda de trazas  
**(TrackSelector)**

# Búsqueda de muones cuasi-horizontales

Selección de sub-eventos

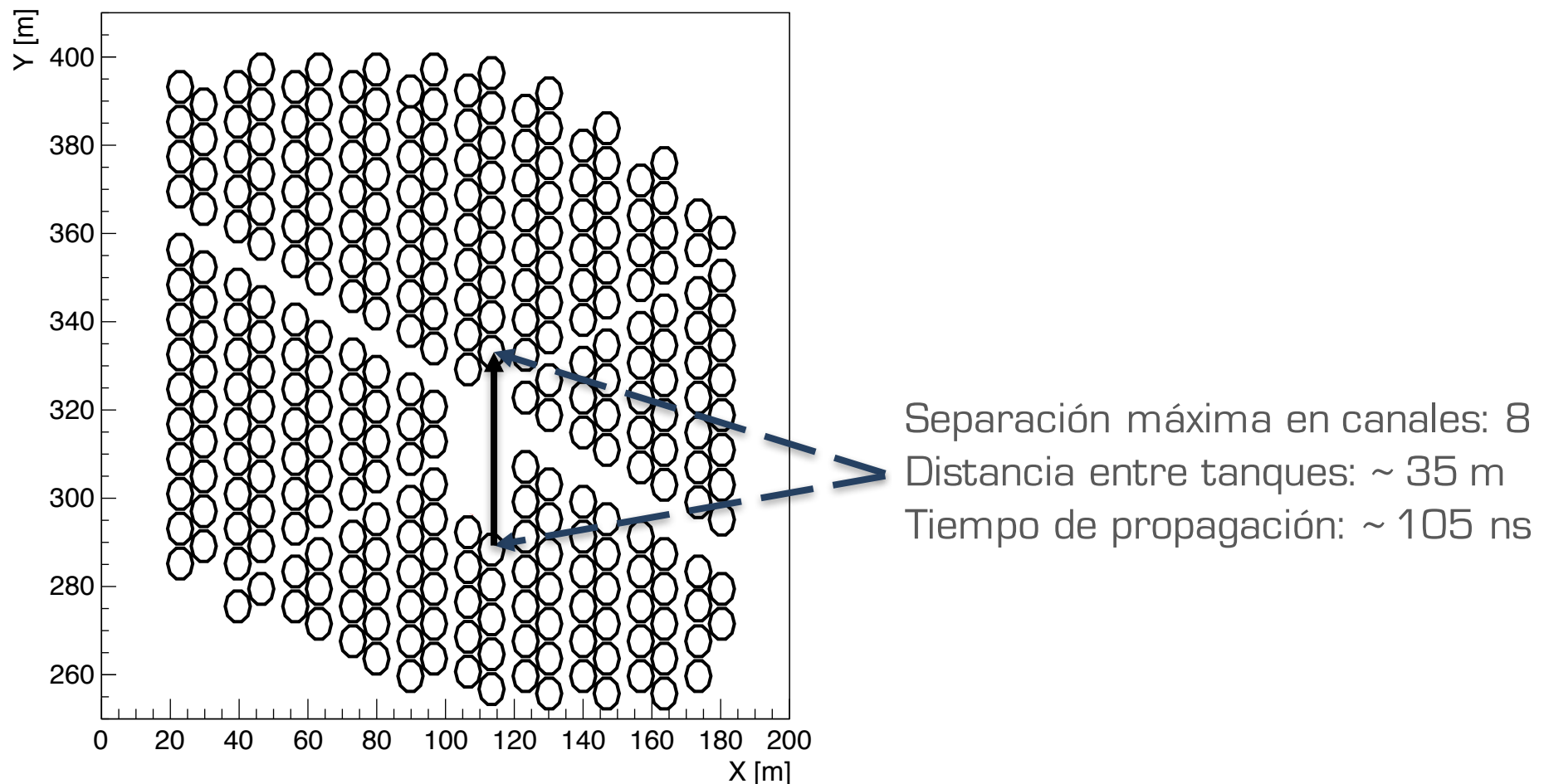
\* Propagación con velocidad  $\sim 30$  cm/ns



Las señales en cada PMT dentro del tanque podrán ser generadas directamente por el cono Cherenkov o por luz reflejada en el *bladder*

# Búsqueda de muones cuasi-horizontales

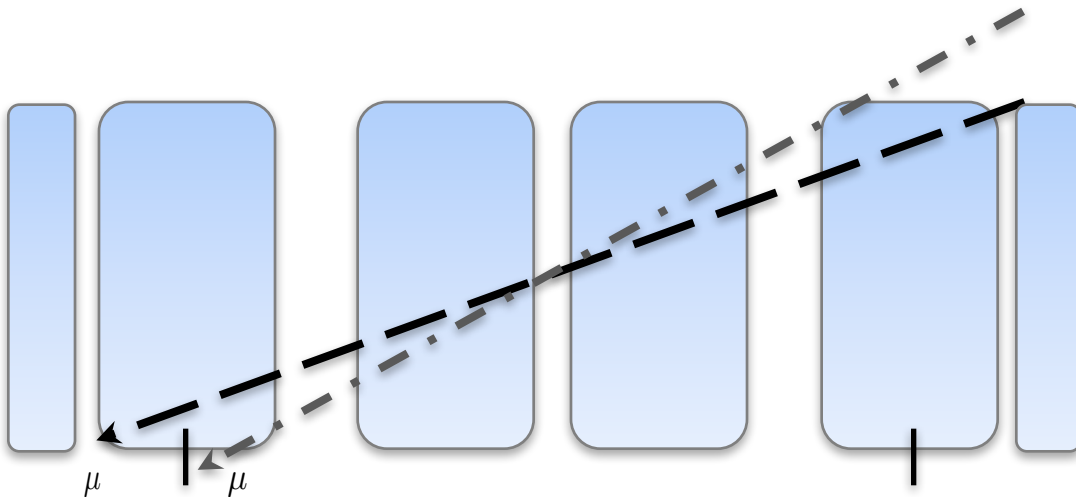
Debido a la distancia no uniforme entre tanques necesario considerar una ventana amplia: 150 ns y separación entre canales: 200 (debido a su numeración secuencial)



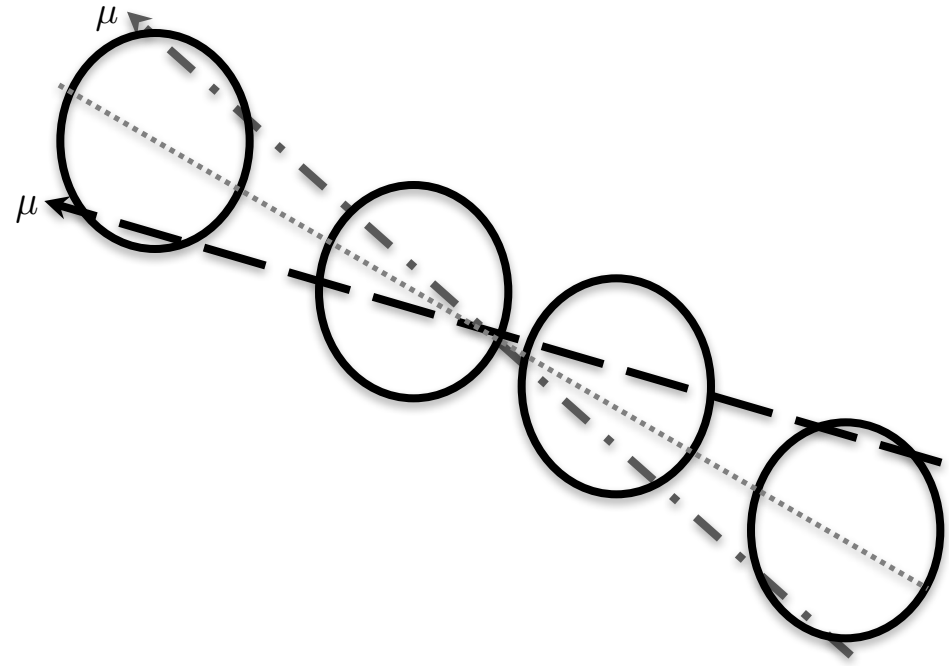


# Reconstrucción de trazas

Determinación del ángulo polar (plano X-Z)



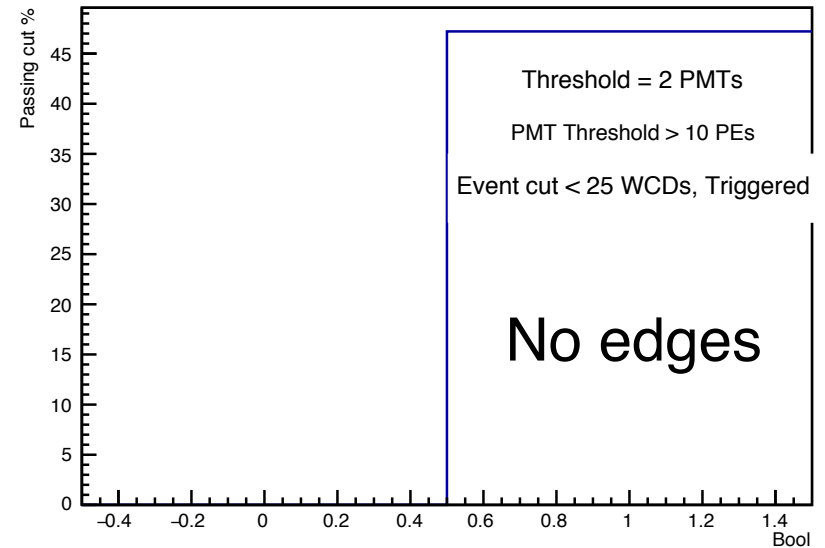
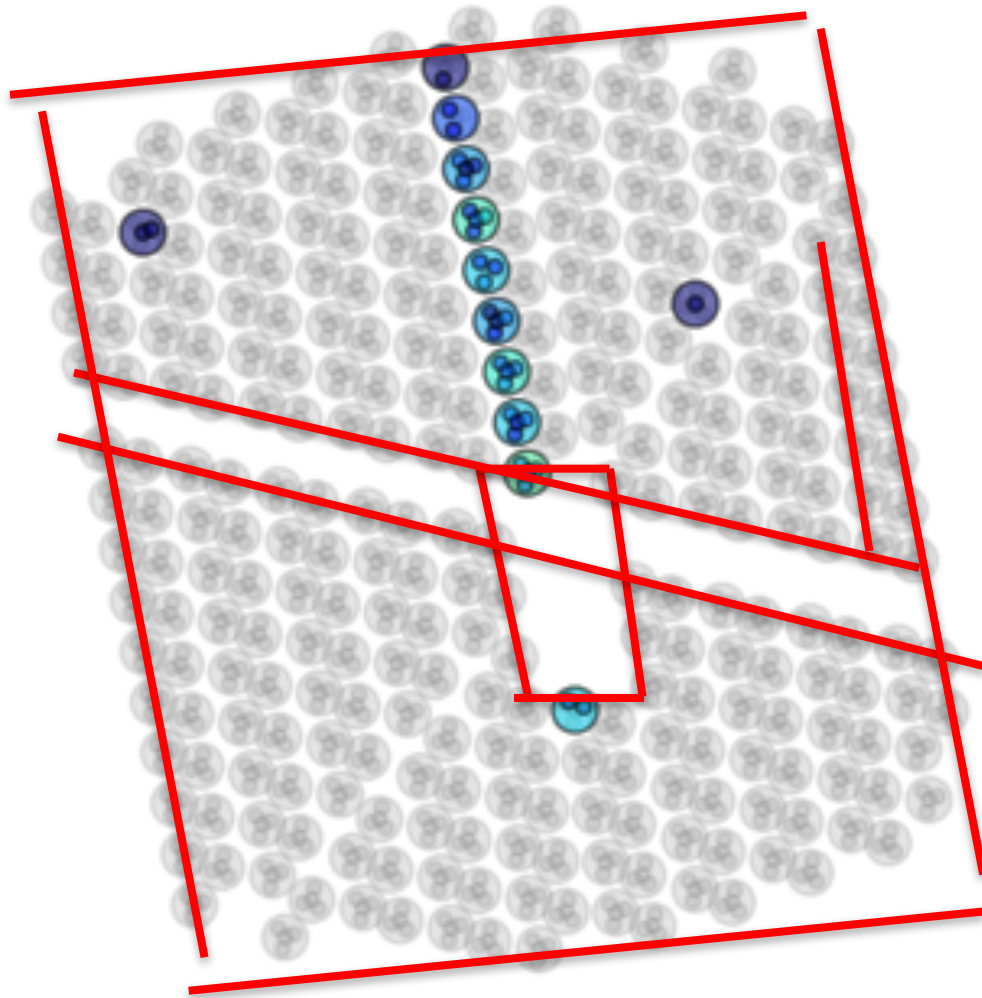
Determinación del ángulo azimutal (plano X-Y)



- La versión actual del algoritmo utiliza a cada WCD como un pixel
- Se asume que todos los muones se propagan de arriba hacia abajo y con una velocidad consistente con  $c$
- La dirección de propagación se obtiene utilizando las posibles geometrías permitidas por los pixeles que conforman las trazas



# Trazas totalmente contenidas



~ 47% de las trazas están totalmente contenidas

El corte es para remover trazas que inician o terminan en la frontera del detector con áreas inactivas. Estas trazas tendrán mayor incertidumbre en su reconstrucción angular, especialmente si son cortas.

# Datos y cortes

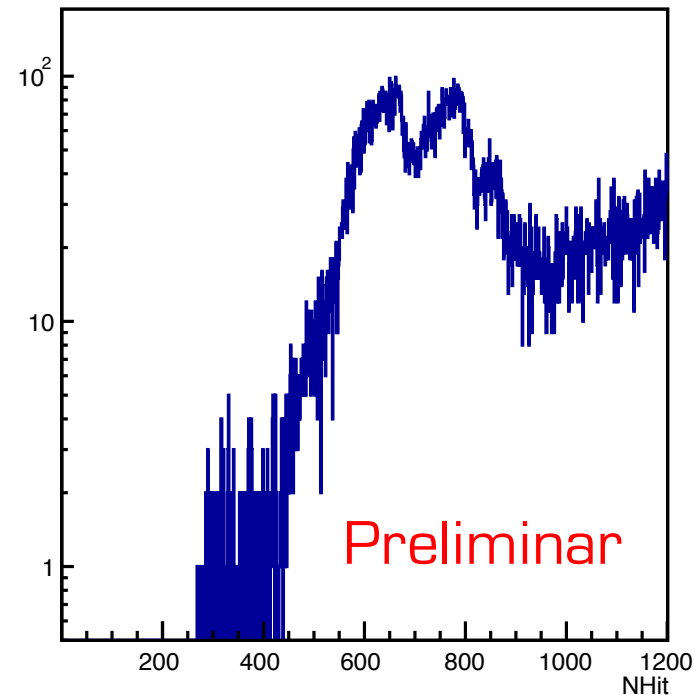
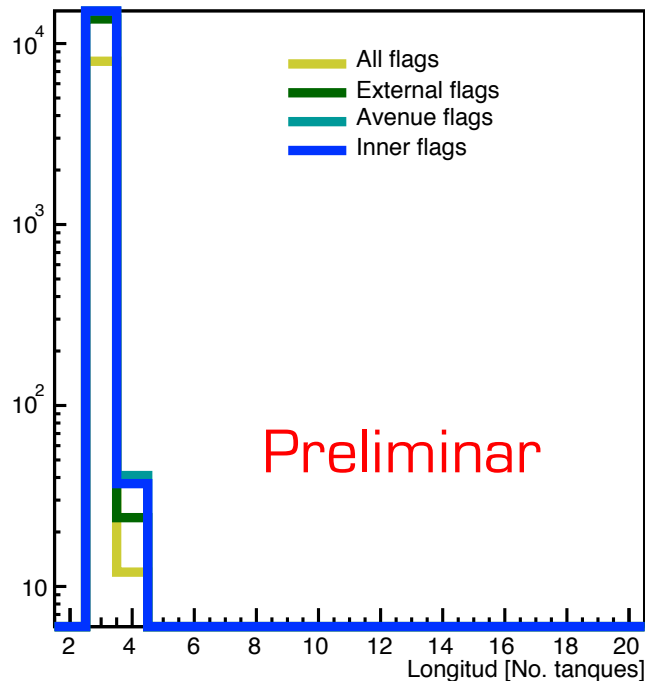
## Datos con trigger:

- 8 runs del mes de mayo de 2017
- Tiempo total: ~ 96 horas (~ 54 TB de datos procesados)

## Criterios de selección:

- Carga mínima en cada PMT: 4 PEs
- Número de PMTs en cada tanque activo: 2
- Indicadores de inicio o fin de la traza en una frontera del detector
- Fracción de tanques activos con 3 PMTs activos en la traza
  - Cortes para descartar ruido aleatorio:
    - Tamaño del evento en el *trigger* (número de PMTs activos totales)
    - Longitud de la traza

# Cortes para descartar ruido aleatorio

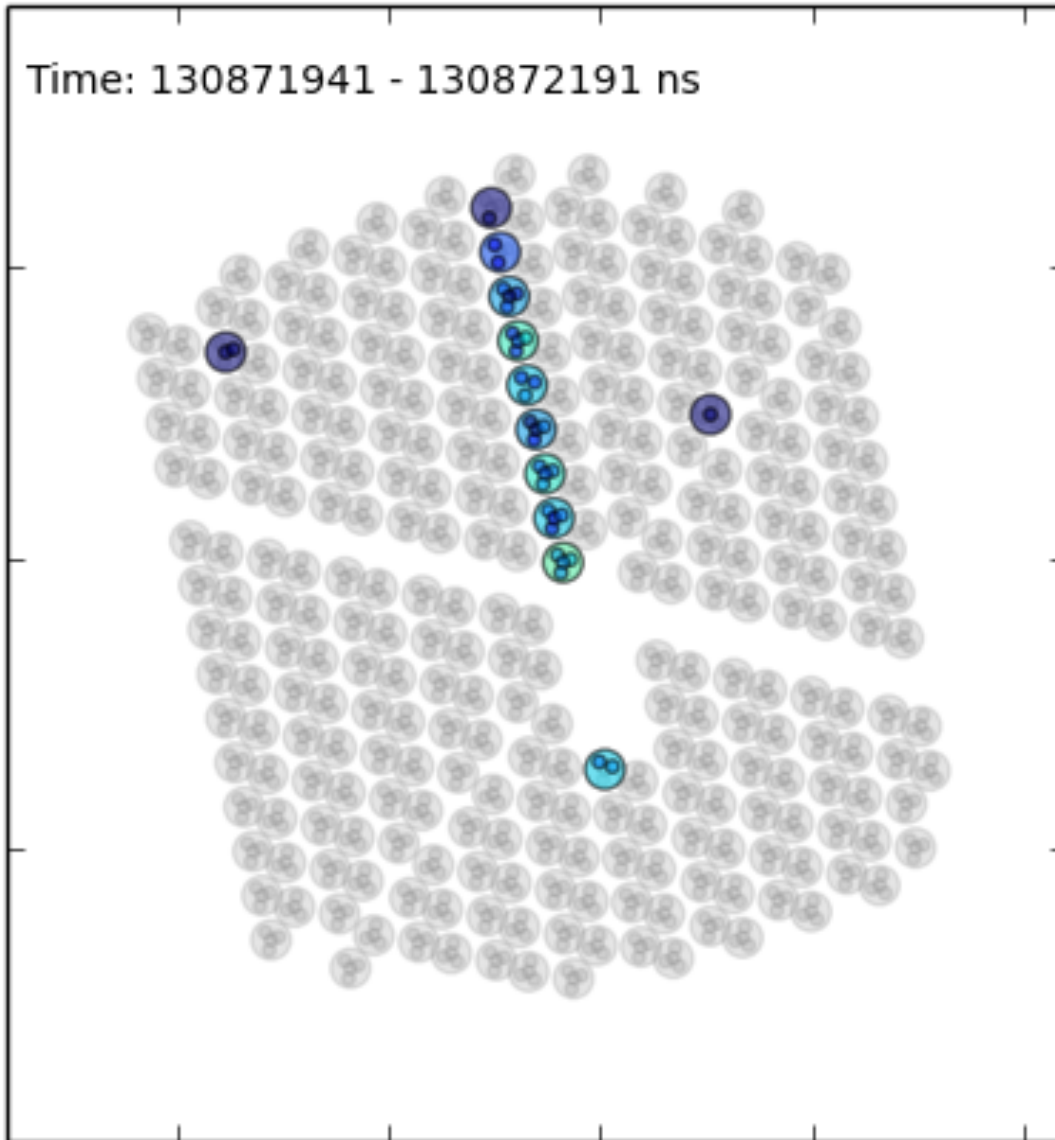


NHit: PMTs  
con señales  
en la ventana  
del *trigger*

Estimación de contaminación por ruido aleatorio: Tomar los eventos reales y asignar las señales a PMTs en el arreglo de manera aleatoria y buscar trazas

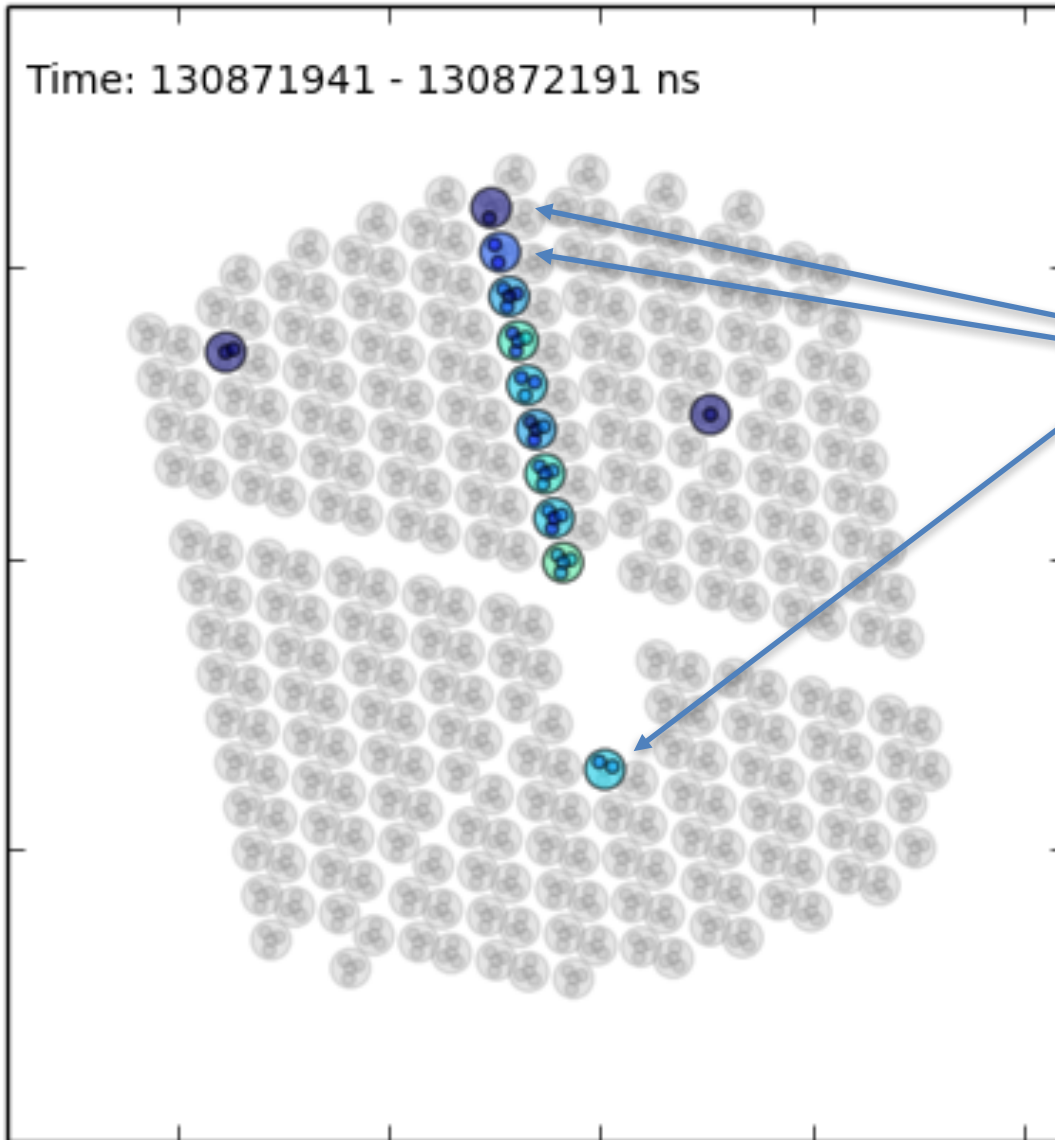
En base a esto se definen los cortes para buscar trazas con baja probabilidad de ser debidas a ruido: Longitudes mayores a 4 WCDs y eventos con menos de 100 hits.

# Corte en PMTs activos a lo largo de la traza



Traza de datos reales mostrada anteriormente

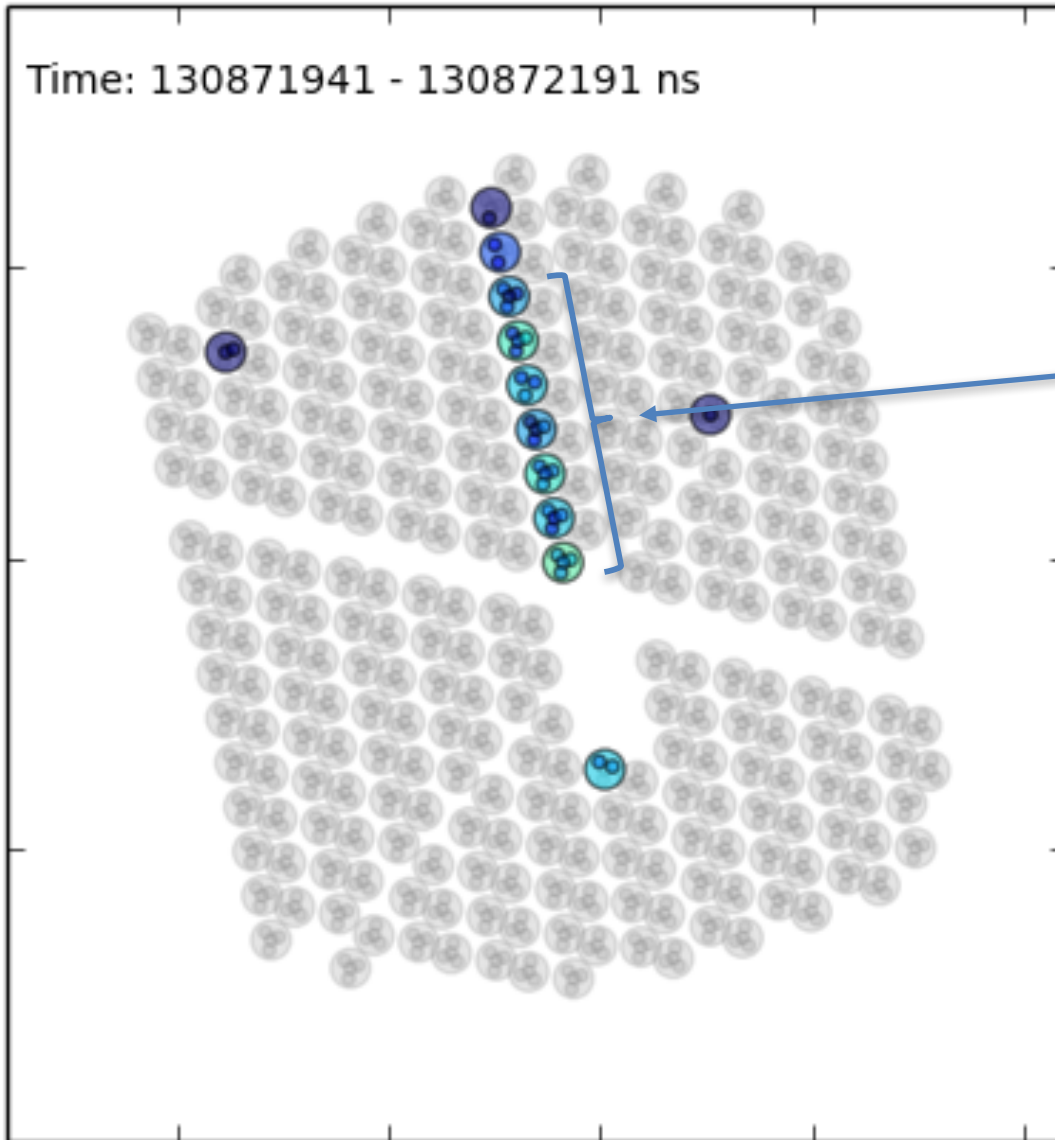
# Corte en PMTs activos a lo largo de la traza



Traza de datos reales mostrada anteriormente

Para una trayectoria diagonal dentro del volumen activo del detector, los primeros y últimos tanques tendrán menos PMTs activos

# Corte en PMTs activos a lo largo de la traza



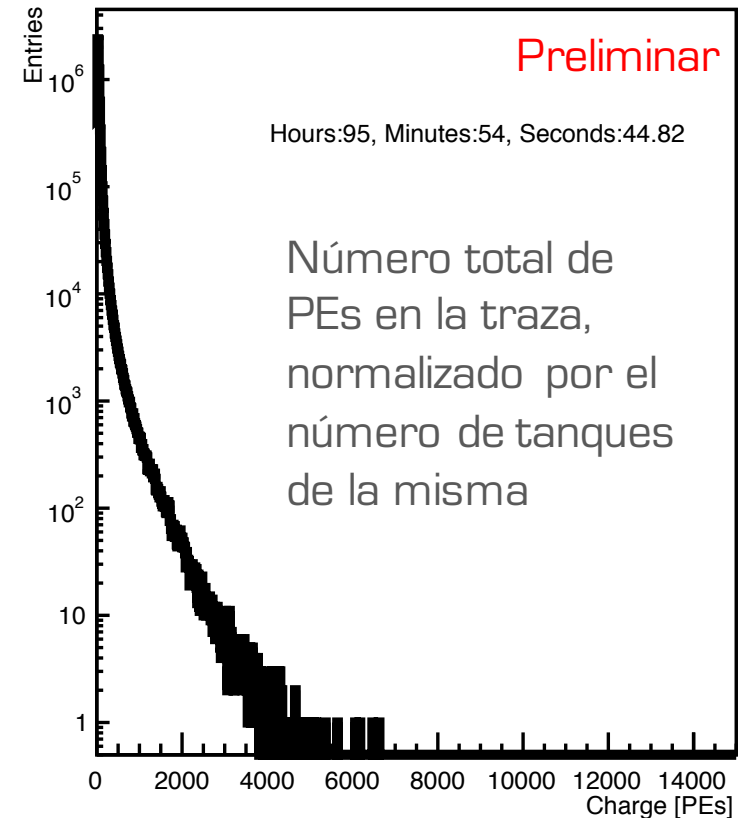
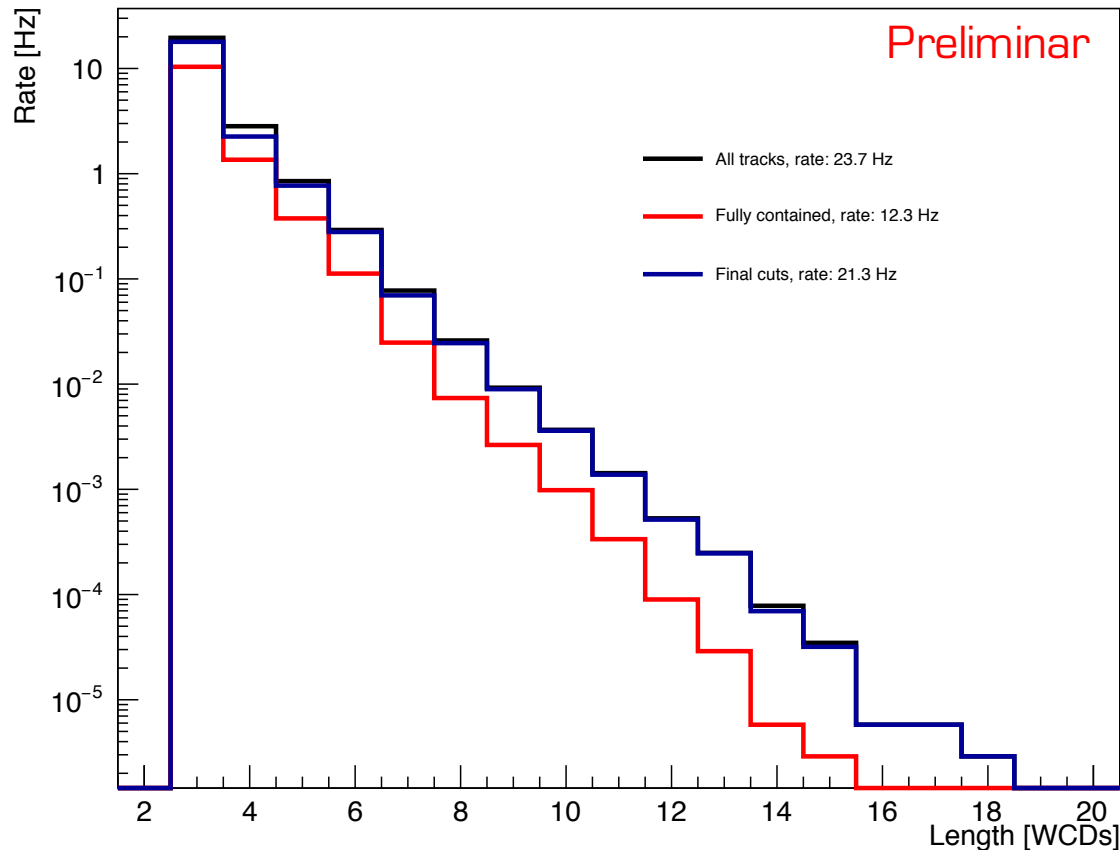
Traza de datos reales mostrada anteriormente

Los tanques en la parte central de la traza tienen más tanques activos, en este caso los 4 PMTs

Es necesario ajustar el valor más común esperado para tanques en los que se activan más de 2 PMTs. Esto se hará en base a estudios con Monte Carlo.

Por el momento: 30 % de los tanques deben tener más de 2 PMTs activos

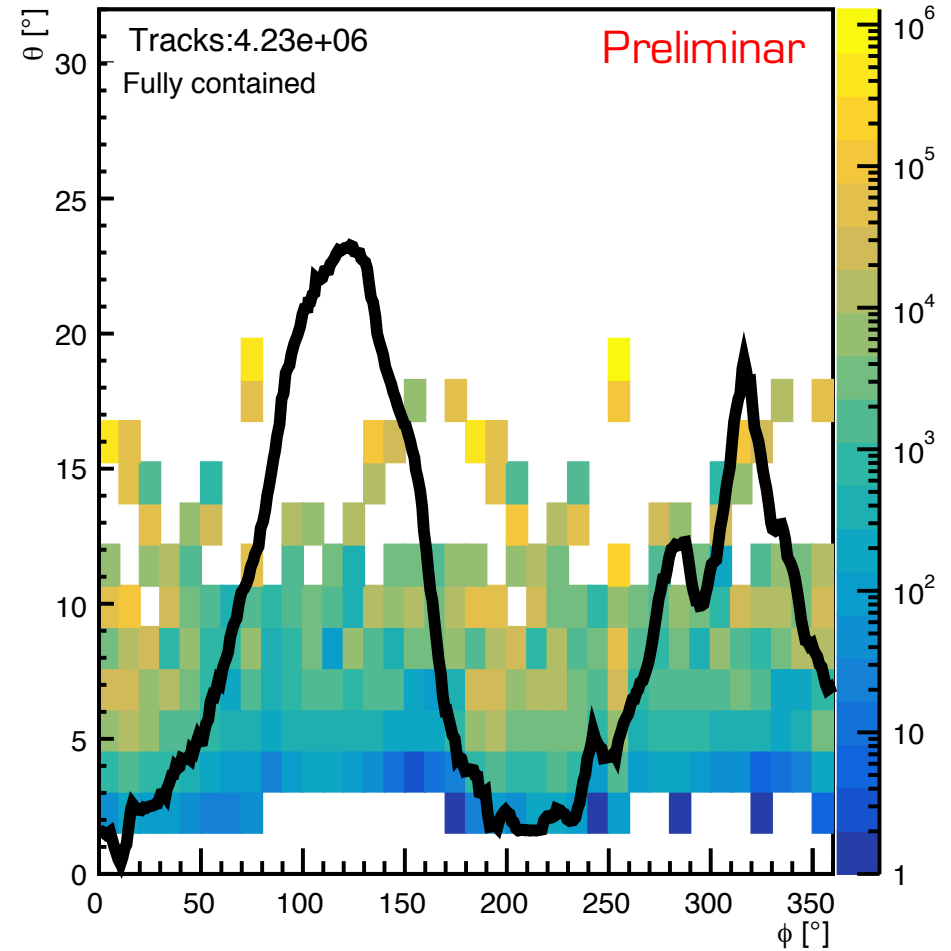
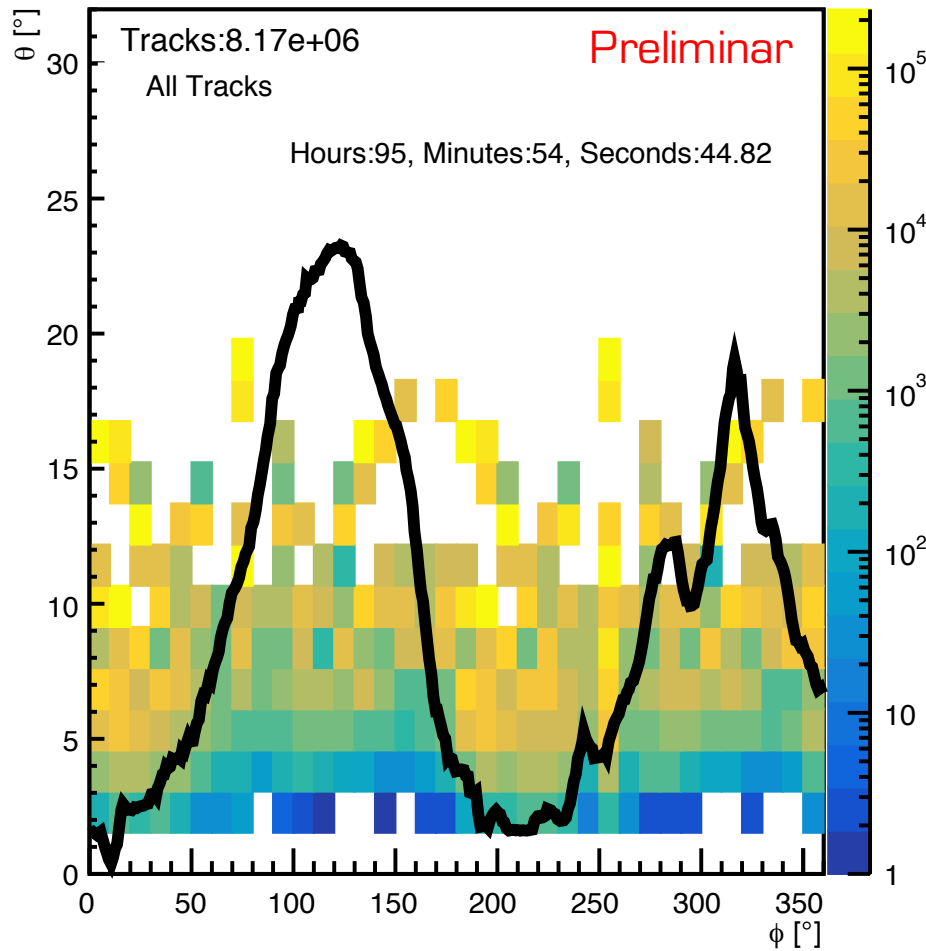
# Primeros resultados



## Cortes “finales”:

- Eventos con menos de 100 hits en la ventana del *trigger* : < 10 % del detector total (promedio)
- Eventos en los cuales se identificó una sola traza
- Si se identificó una cascada atmosférica en el evento, se quitan los hits que forman el plano de la cascada (20 ns alrededor del plano)
- 30% de los tanques que participan en la traza deben tener mínimo 3 PMTs activos

# Dirección de Llegada

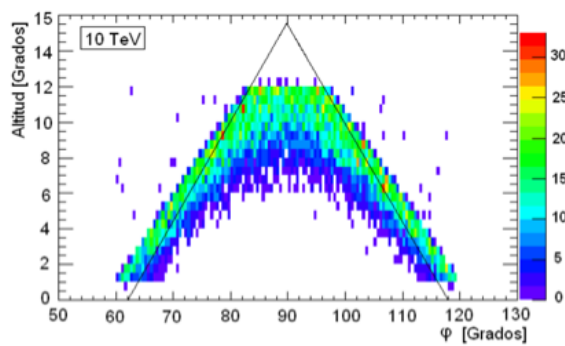
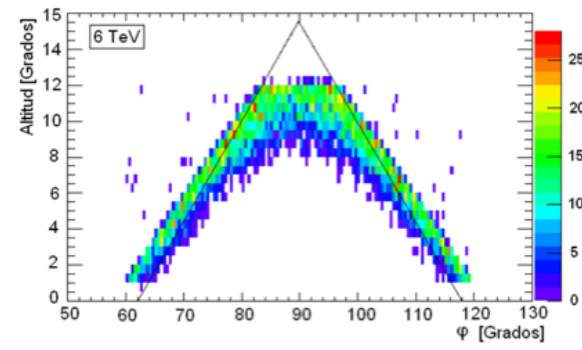
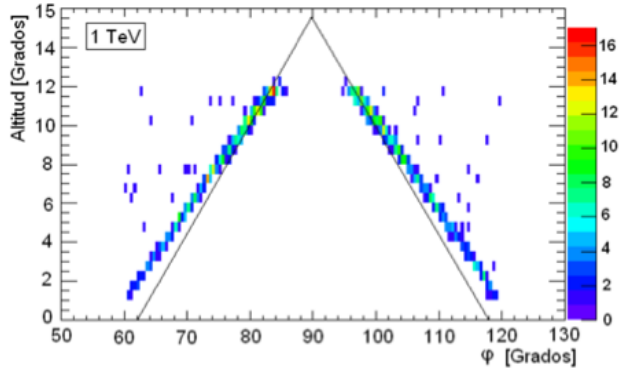


El tamaño de los bins es proporcional a la incertidumbre angular  $\simeq 1.5^\circ$  en  $\theta$  y  $\simeq 10^\circ$  en  $\phi$ . Se prevé mejorar esta resolución.

Estudiando la posibilidad de utilizar la información para estudiar la estructura de las montañas.



# Absorción por el Pico de Orizaba

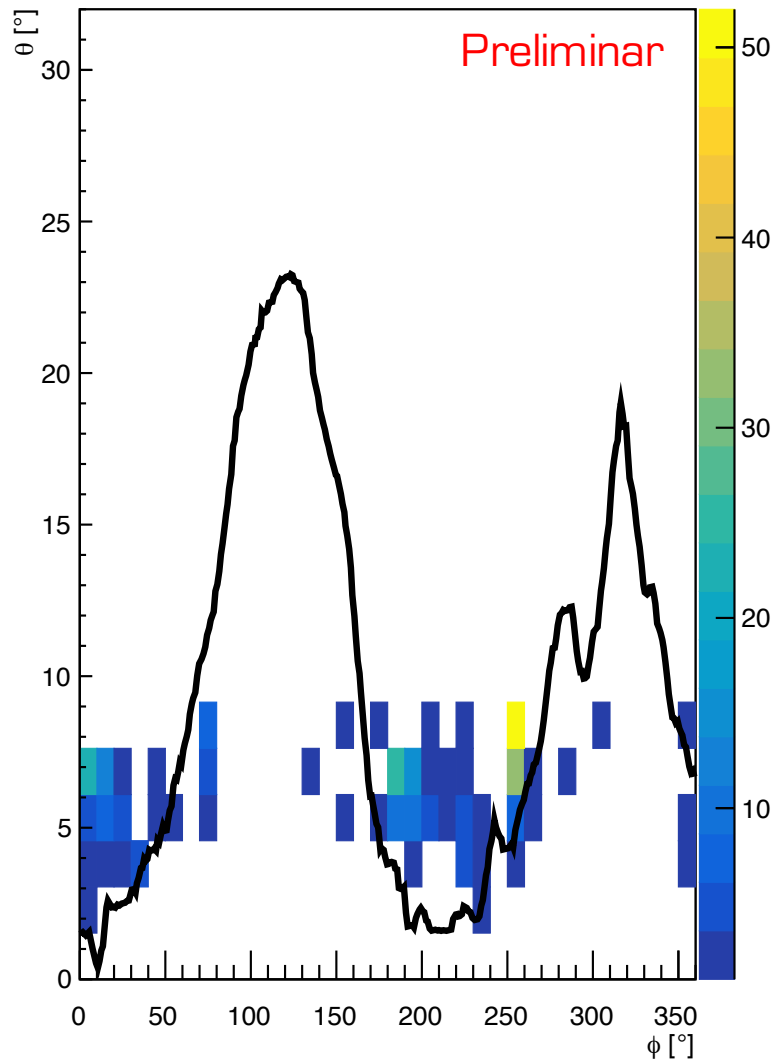


Simulación con GEANT4 modelando al Pico de Orizaba como un cono

La sección central del volcán es útil como un filtro para muones con energía menor a 10 TeV

Tesis de licenciatura  
Luis Joel Hernández  
Facultad de Ciencias, 2017

# Muones de muy alta energía

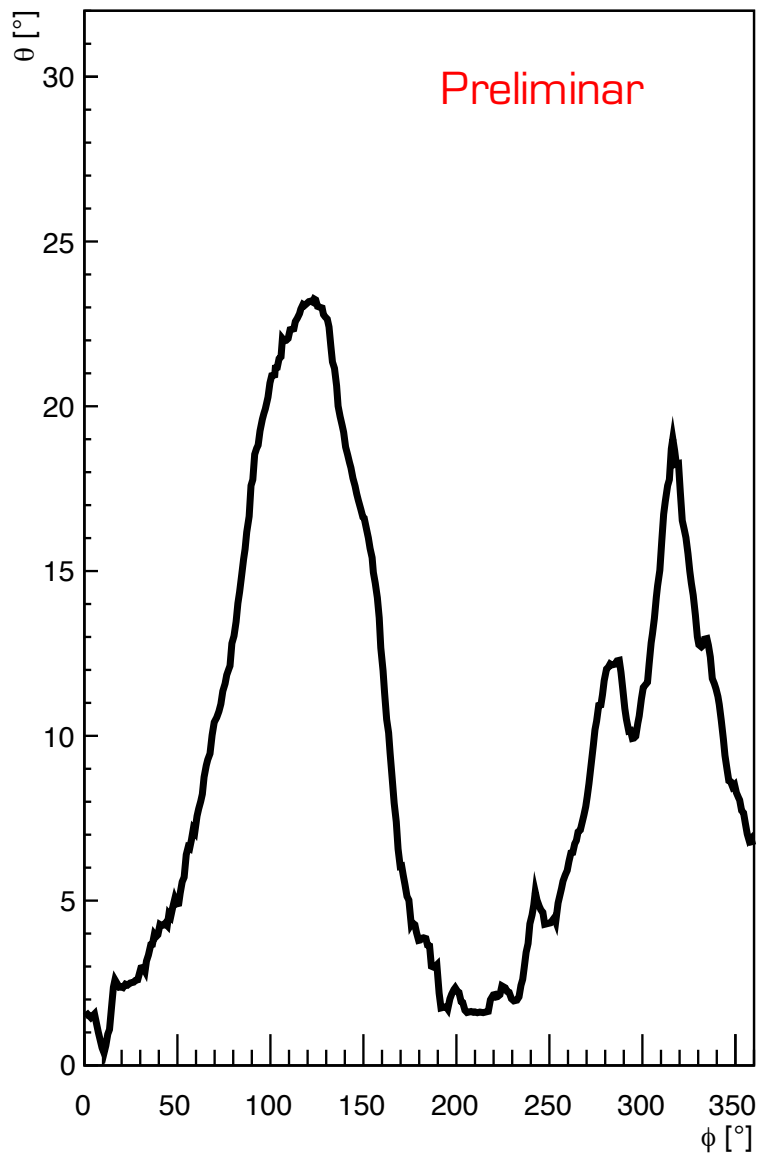


Corte en carga depositada: 800 PEs  
En base a simulaciones, correspondería a leptones de  $\sim 1$  PeV

Las señales son raras y las montañas actúan como un filtro efectivo.

- Hits no relacionados a una cascada
- Más de 4 tanques en la traza
- Mínimo 30% de los tanques tienen más de 3 PMTs activos

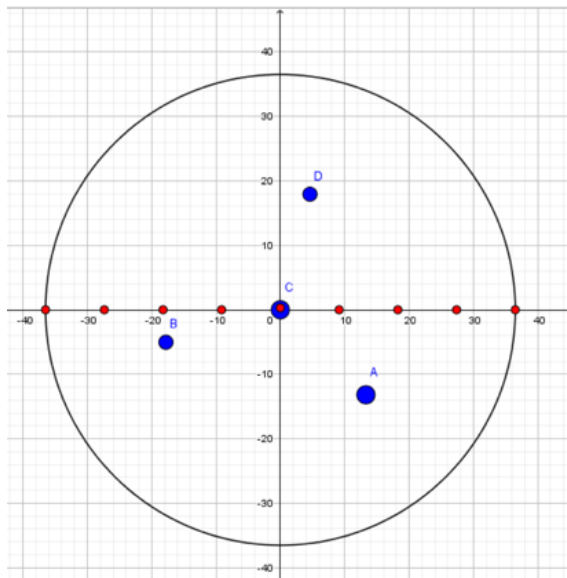
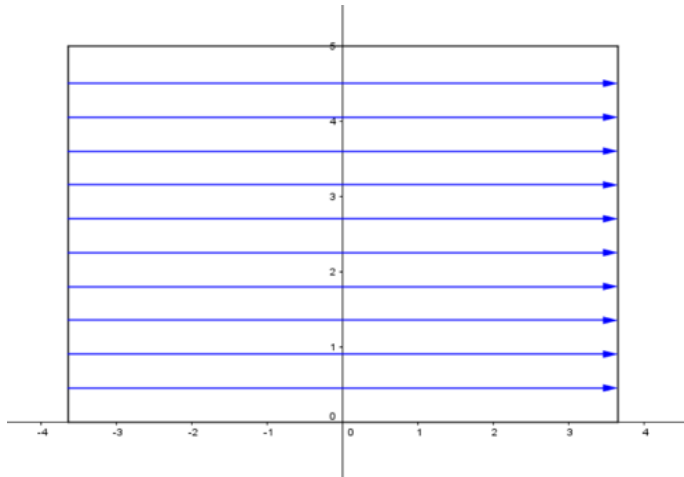
# Muones de muy alta energía ( $> 5$ PeV)



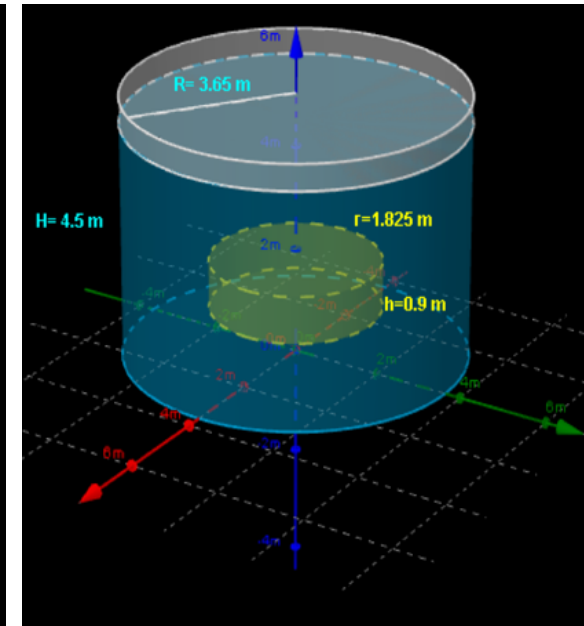
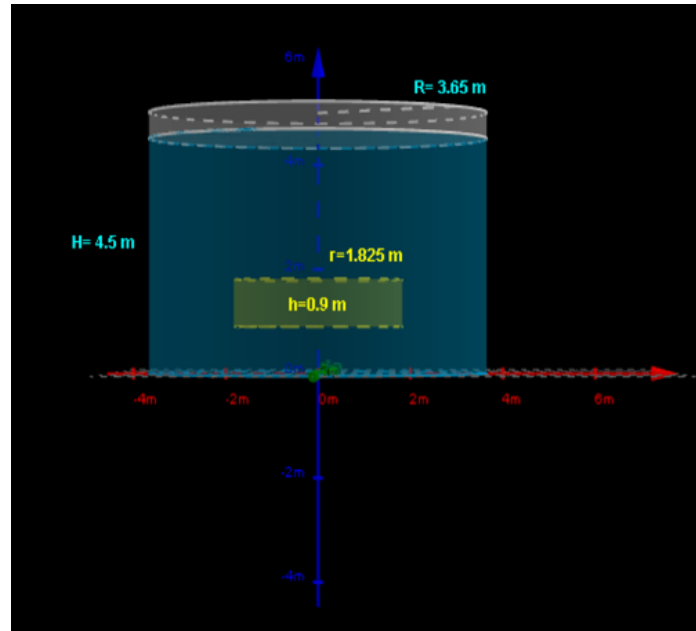
El rango dinámico de la electrónica de HAWC debería permitir encontrar por lo menos señales de muones de hasta 5 PeV

Hasta ahora ninguna señal con tanta carga depositada ( $>4000$  PEs).

# Mejoras en la resolución angular y desarrollo de un estimador de energía



Tesis de licenciatura  
Roberto Angeles Camacho  
Facultad de Ciencias, 2018



- Simulación de muones que pasan a través de los tanques con diferentes trayectorias y energías
- Estudiar en que regiones un muon de cierta energía activará cierto número de PMTs 80% de las veces
- Imágenes para muones de 1 TeV y 4 PMTs
- Con esta información se podrá mejorar la reconstrucción angular

# Y siendo muy optimista...

Ya tenemos un código para buscar posibles asociaciones a fuentes conocidas en caso de encontrar una señal

