



4 de noviembre de 2018

# El Observatorio HAWC

SERGIO HERNÁNDEZ CADENA  
Instituto de Física, UNAM  
Hackathón Astronómico

## Resumen

El Observatorio HAWC es un experimento para detectar rayos gamma de muy alta energía. Se espera que HAWC pueda revelar objetos donde ocurren los fenómenos más violentos del Cosmos. Desde su inauguración, en marzo de 2015, HAWC ha observado más de 50 fuentes en el rango más alto de energía. Debido a su operación continua y su campo amplio de visión, HAWC permite el monitoreo del cielo que pasa por encima de este observatorio.

## 1. HAWC

El Observatorio HAWC<sup>1</sup> es un experimento de segunda generación que consiste de un arreglo extendido de 300 módulos para colectar partículas cargadas originadas en la interacción de un rayo cósmico o rayos gamma de muy alta energía provenientes del espacio exterior. El Observatorio HAWC se encuentra en el Parque Nacional Orizaba a una altura de 4100 m.s.m, en una planicie entre los volcanes Tiltépetl (Sierra Negra) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), en Puebla México, Figura 1. Las 300 unidades modulares que componen a HAWC son tanques de 5 m de altura y 7.3 m de diámetro, los cuales están llenos con 200000 litros de agua ultrapurificada ( $> 80\%$ ), en los cuales se han 4 tubos fotomultiplicadores para colectar la luz Chrenkov producida por partículas cargadas al atravesar cada uno de los módulos.

El Observatorio HAWC fue inaugurado en marzo de 2015, fecha desde la cual opera con el arreglo de 300 módulos, aunque desde años atrás, comenzó a operar en diversas etapas de la construcción, al contar con 30, 100 y 250 módulos completamente instalados. HAWC es el resultado del esfuerzo de varias instituciones nacionales e internacionales. En primera instancia, México y Estados Unidos, países que iniciaron con la construcción y financiamiento del detector. En etapas posteriores, se han unido el Alemania y Polonia. Actualmente, la colaboración HAWC consiste de cerca de 150 personas, entre investigadores y estudiantes.

HAWC tiene como objetivo revelar fuentes donde sean producidos los fotones más energéticos del universo (a escalas de  $\text{TeV}^2$ ), como en remanentes de supernovas, microquasares, sistemas binarios, colisión de estrellas de neutrones, núcleos activos de galaxias, materia oscura, supernovas, regiones de formación estelar, entre muchos otros.

---

<sup>1</sup>HAWC: High Altitude Water Cherenkov. Observatorio de Gran Altura de Cherenkov en Agua

<sup>2</sup>Para tener una idea clara, 1 eV (electrónVolt) es la energía que gana un electrón al estar en una diferencia de potencial igual a 1 Volt. Esta energía es comparable a la energía que poseen los fotones de la luz visible (como la producida en un foco de hogar). Para nuestro, 1 TeV (Tera-eV;  $1\text{T} = 1 \times 10^{12}$ ) eV, 1 billón de eV

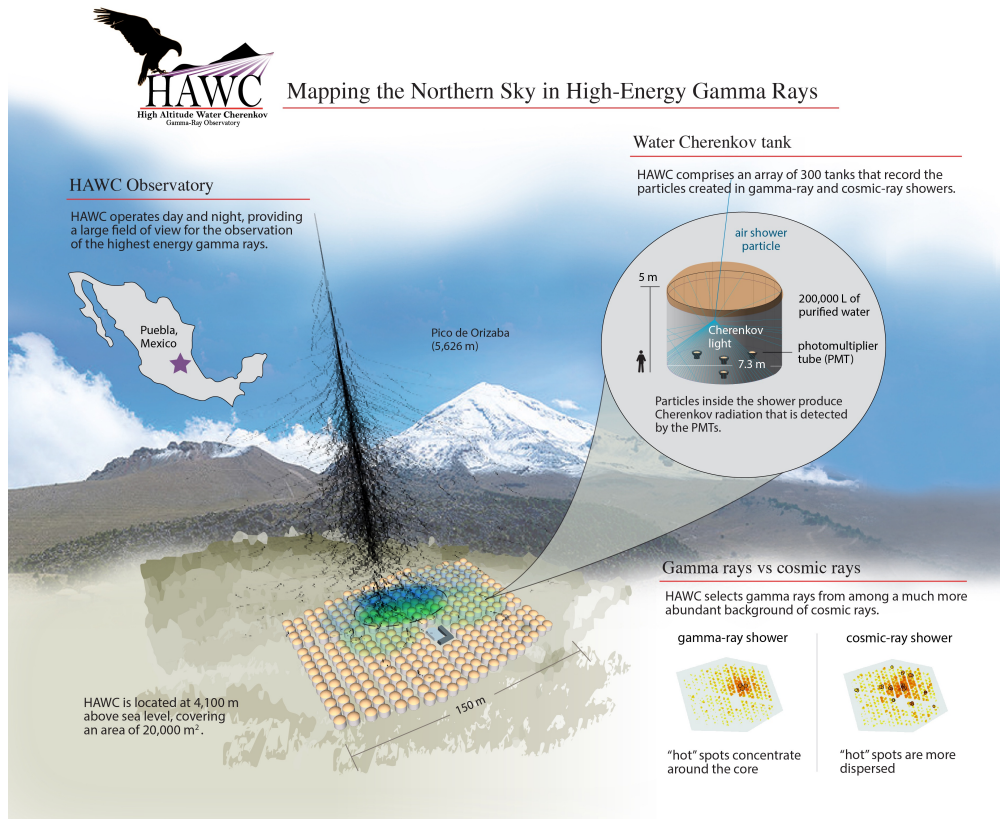


Figura 1: El Observatorio HAWC

En cada una de las secciones posteriores se describirá de manera breve algunos de los aspectos más importantes del observatorio HAWC; cascadas atmosféricas, radiación Cherenkov, colección de datos, procesamiento de datos y algunos ejemplos de análisis.

## 2. Cascadas atmosféricas

En HAWC, la detección de rayos gamma y rayos cósmicos se lleva a cabo por la colección de partículas secundarias en la producidas tras la interacción del rayo gamma o rayo cósmico (partícula primaria) con un núcleo atómico de la atmósfera, Figura 1. Dicha interacción, típicamente ocurre a una altura de 18 km. Las partículas producidas en tiempos sucesivos se propagan sobre un plano a lo largo de la trayectoria de incidencia de la partícula primaria. A este fenómeno se le conoce como cascada atmosférica, y en algunos casos puede llegar a tener una extensión de decenas de km<sup>2</sup>. El número de partículas secundarias producidas depende de la energía de la partícula primaria y de la altura de la columna de aire que tienen que atravesar. El número máximo de partículas secundarias se alcanza típicamente a una altura de entre 5 y 10 km, a partir de la cual, algunas partículas comienzan a perder energía por diversos procesos, como decaimiento, dispersión, etc. Típicamente, las partículas que componen las cascadas atmosféricas son electrones, positrones, protones, muones, fotones, piones y kaones.

### 3. Radiación Cherenkov

Cuando partículas cargadas provenientes de una cascada atmosférica atraviesan los módulos de detección de HAWC, algunas de éstas viajan a velocidades superiores a la velocidad de la luz en el agua ( $c_{\text{agua}} \sim 0.76 c_{\text{vacío}}$ ). Cuando esto ocurre, se genera un efecto de choque electromagnético<sup>3</sup> debido a la rápida polarización que sufren las moléculas del agua. Cuando las moléculas regresan a su estado base, se emite un pulso de luz, radiación Cherenkov, cuya longitud depende del material en donde se produce (en el caso de agua, en el azul-ultravioleta).

### 4. Colección y primer procesamiento de datos

Cuando una cascada atmosférica pasa a través de HAWC, partículas cargadas producen luz Cherenkov, la cual es colectada por los tubos fotomultiplicadores en el fondo de cada módulo de detección. En estos eventos se registra el tiempo y la cantidad de carga depositada en cada fotomultiplicador. Para que se inicie la adquisición de datos de un evento determinado, se requiere que en una ventana de 250 ns<sup>4</sup>, al menos 28 fotomultiplicadores registren luz. Para poder estimar cantidades relacionadas a la partícula primaria se realizan varios cálculos y ajustes. A continuación se explican de manera breve. En primer lugar, las cantidades de interés referentes a la partícula primaria son su dirección y energía. Estas cantidades están relacionadas con la cantidad de carga depositada en el arreglo de HAWC, los tiempos registrados en cada fotomultiplicador y la posición del centro de la cascada. Por lo tanto, es necesario poder estimar estas cantidades de manera precisa.

1. La estimación del centro de la cascada se realiza mediante cálculos de centro de masa. En primera instancia, el centro de la cascada corresponde a la posición en la que viajan la mayor cantidad de partículas.
2. La estimación de la dirección en la que proviene la partícula primaria, depende del cálculo del centro de la cascada y de los registros de tiempo mientras pasaba la cascada. Figura 2.
3. El cálculo de energía de la partícula primaria está relacionado a la cantidad de carga depositada en cada fotomultiplicador. Después de estimar la cantidad total de carga, esta puede compararse a la carga depositada por cascadas atmosféricas simuladas para diversas partículas primarias con diferentes ángulos de incidencia. Figura 3.
4. Por usar la distribución de carga depositada durante el evento, también es posible determinar la naturaleza de la partícula primaria. Para el caso de un rayo gamma, se espera que la distribución sea uniforme y que disminuya conforme la distancia al centro de la cascada aumente. Por el contrario, los rayos cósmicos pueden identificarse, pues la distribución de carga no es uniforme, encontrando zonas donde el depósito de carga es muy grande, comparable a la carga en el centro de la cascada. Esto se debe a que en las cascadas de rayos cósmicos son producidos muones

---

<sup>3</sup>El efecto puede compararse a cuando un objeto rompe la barrera del sonido en un medio determinado

<sup>4</sup>1ns =  $1 \times 10^{-9}$ s

(partículas con la misma carga del electrón pero 200 veces su masa), los cuales transportan una enorme cantidad de energía. Figura 3.

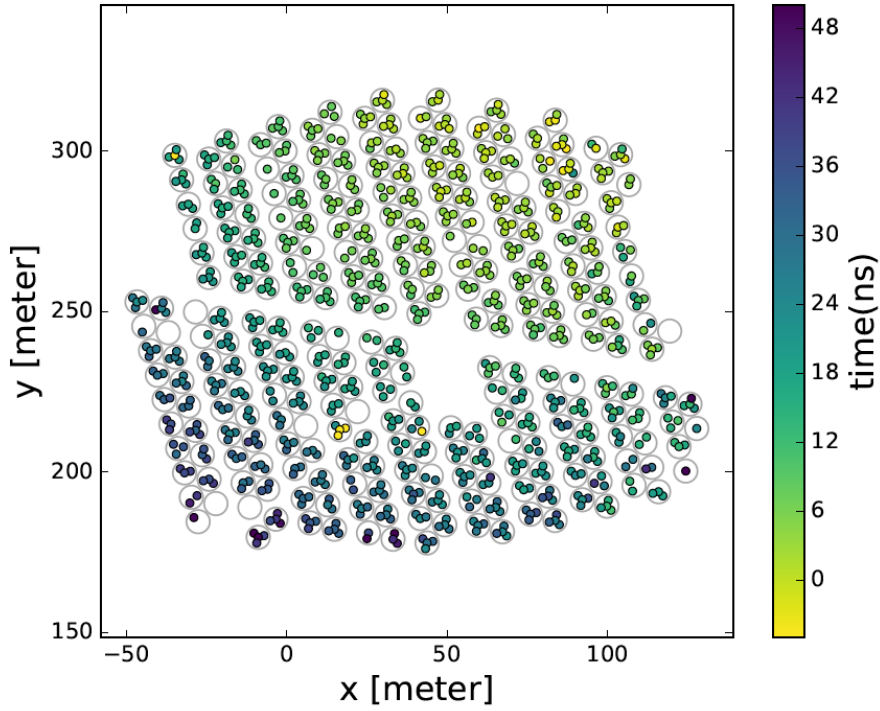


Figura 2: Ejemplo de un evento en HAWC. Los círculos grandes representan los módulos de detección de HAWC, y los círculos pequeños representan los fotomultiplicadores al interior de cada módulo. En color se muestra el tiempo en que fue “encendido” cada fotomultiplicador. En este caso, la cascada es tal que se propaga desde la parte superior derecha del arreglo hacia abajo.

## 5. Segundo procesamiento. Producción de mapas

Para que en un evento sea considerado como tal y se puedan reconstruir la dirección y determinar el tipo de partícula primaria, se necesita que los datos cumplan con ciertos cortes de calidad. Eventos que pasan estos filtros, son considerados para reconstrucción. Una fase posterior a la reconstrucción de eventos, es la producción de mapas, en la que se registran la cantidad de eventos registrados por cada región del cielo. Los mapas son importantes para el posterior análisis de objetos astrofísicos. Existen varios tipos de análisis que pueden llevarse a cabo, análisis de variabilidad (a escala de días, meses, etc.), y análisis después de la integración de un enorme período de colección de datos. Dependiendo del tipo de fenómeno que se esté estudiando se elige entre uno u otro método. Por ejemplo, si se asume que la emisión proveniente de una fuente es estable, dependiendo de su intensidad, se necesita cierta cantidad de tiempo para poder observarla, en este caso los análisis que implican un período largo de colección de datos son los mejores, Figura 4. En el caso de que la emisión de la fuente se debe a fenómenos transitorios (de muy poca duración), la producción de mapas diarios o mensuales permiten analizarlos.

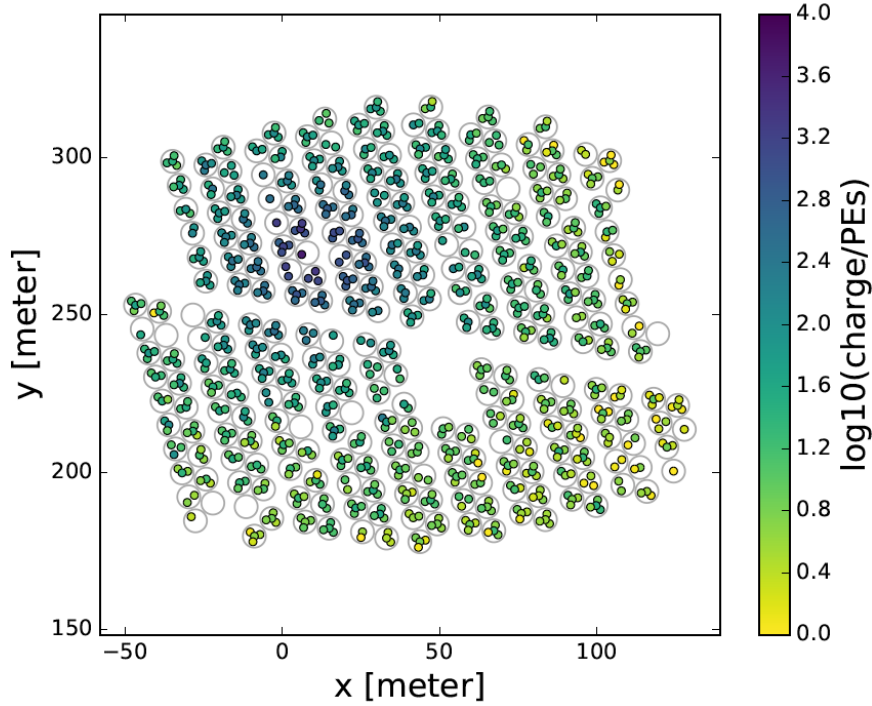


Figura 3: Ejemplo de un evento en HAWC. Los círculos grandes representan los módulos de detección de HAWC, y los círculos pequeños representan los fotomultiplicadores al interior de cada módulo. En color se muestra el logaritmo de la carga depositada en cada fotomultiplicador. En este caso, la mayor concentración de carga ocurre al centro de la cascada. También se puede observar que la carga disminuye conforme la distancia al centro de la cascada aumenta. Este evento es un ejemplo de una cascada atmosférica originada por un rayo gamma.

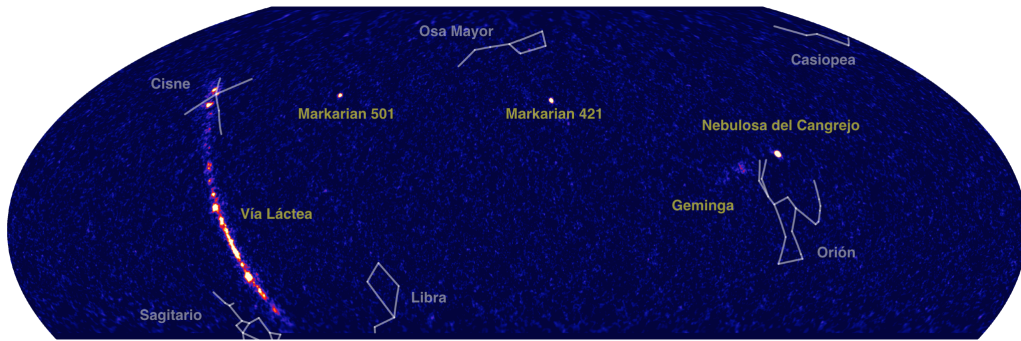


Figura 4: El cielo observado por HAWC. Mapa obtenido tras dos años de observación.

Para saber más puede consultar: [Collaboration, 2017b, Collaboration, 2018, Collaboration, 2017c, Collaboration, 2017d, Collaboration, 2017a]. En particular en [Collaboration, 2017d] puede encontrar una descripción más detallada sobre la operación de HAWC. Los textos citados se encuentran en inglés.

## Referencias

- [Collaboration, 2017a] Collaboration, T. H. (2017a). The 2hwc hawc observatory gamma-ray catalog. *APJ*, 843:21.
- [Collaboration, 2017b] Collaboration, T. H. (2017b). Daily monitoring of tev gamma-ray emission from mrk 421, mrk 501, and the crab nebula with hawc. *APJ*, 841:13.
- [Collaboration, 2017c] Collaboration, T. H. (2017c). Extended gamma-ray sources around pulsars constrain the origin of the positron flux at earth. *Science*, 358:911–914.
- [Collaboration, 2017d] Collaboration, T. H. (2017d). Observation of the crab nebula with the hawc gamma-ray observatory. *APJ*, 843:17.
- [Collaboration, 2018] Collaboration, T. H. (2018). Data acquisition architecture and online processing system for the hawc gamma-ray observatory. *NIM–Physics Research A*, 888:138–146.