

## HAWC: UN NUEVO OBSERVATORIO DE RAYOS GAMMA EN MÉXICO

*Dra. María Magdalena González*

*Investigador Titular A TC*

*magda@astroscu.unam.mx*

*Dr. Rubén Alfaro*

*Dr. Ernesto Belmont-Moreno*

*Dr. Varlen Grabski*

*Dr. Arnulfo Martínez-Dávalos*

*Dr. Arturo Menchaca-Rocha*

*Dr. Andrés Sandoval*

## HAWC un nuevo observatorio de rayos gamma en México

### Resumen

La astrofísica de rayos gamma de muy alta energía es un área de investigación nueva en la ciencia, que nos abre una ventana para observar un universo violento, energético, extremo y transitorio. En México, esta área se está desarrollando alrededor del observatorio HAWC, un proyecto bi-nacional entre Estados Unidos de Norte América y México. HAWC es un observatorio de frontera de rayos gamma que está siendo construido en el Volcán Sierra Negra, Puebla, a 4 100m de altitud. Entre otras de las características que lo hacen único en el mundo, están su diseño, que no incluye ni antenas ni espejos, sino técnicas de detección de partículas de alta energía; su capacidad de operación durante las 24 horas del día, y su campo de visión de casi 70 grados. Desde la elección del sitio de HAWC en México en 2007, científicos de diferentes áreas como geofísica, física de rayos cósmicos, física de altas energías y astronomía, han trabajado conjuntamente en su desarrollo, instalando un primer prototipo que ya está en operación. En este artículo se presenta a HAWC, su diseño y caso científico, así como los avances y estado de construcción.

**Palabras clave:** Sierra Negra, HAWC, rayos gamma, observatorio, rayos cósmicos.

### Abstract

The very high-energy gamma ray astrophysics is a new research area in science that opens up a window to observe a violent, highly energetic and transitory universe. In México, it is developing around the HAWC observatory, a bi-national project between United States and México. HAWC is a ground based gamma ray observatory of international level that is being built in the Volcano Sierra Negra at 4100 m altitude. Other characteristics that make it unique are its design that does not include mirrors or antennas but techniques of high energy particle detection, its 24 hours of duty cycle and its almost 70 degrees of field of view. Since the site selection of HAWC in 2007, scientist of different areas such as geophysics, cosmic rays, high energy and astronomy, have been working together in the construction of HAWC, installing a first prototype that is now operational. In this article, HAWC, its design and scientific case are presented as well as the progress and status of its construction.

**Keywords:** Sierra Negra, HAWC, gamma rays, observatory, cosmic rays.

### Introducción

Durante los últimos siglos el conocimiento del ser humano sobre el universo que le rodea ha aumentado vertiginosamente y las diferentes áreas del conocimiento se han especializado en múltiples sub-áreas de estudio. Todo este conocimiento y sus consecuencias tecnológicas se reflejan en la complejidad de las relaciones humanas con sus semejantes, con la naturaleza que le rodea y su universo. Esta complejidad está requiriendo que las sub-áreas de especialización del conocimiento converjan y se traslapen para obtener una visión multi-disciplinaria e integral del ser humano, su naturaleza y universo. La astronomía no es la excepción. figura, crab-diffnu

Hasta antes de la Segunda Guerra Mundial, la astronomía óptica era la única astronomía existente. Con la invención del radar, se desarrolló la radioastronomía y poco tiempo después, con el desarrollo de la tecnología

espacial, llegó la astronomía de rayos X. La primera fue aceptada lentamente como astronomía “real”, debido a que no todos los fenómenos astrofísicos o fuentes emiten ondas de radio, mientras que la astronomía en rayos X fue rápidamente aceptada por las razones opuestas. La astronomía de rayos gamma tuvo una aceptación todavía menor que la radio-astronomía, principalmente porque las fuentes astrofísicas de rayos gamma parecían ser tan escasas como las terrestres, situación que cambió en las últimas dos décadas, primero con la observación de miles de Destellos de Rayos Gamma (GRBs por sus siglas en inglés), cuyo origen todavía no se entiende, y luego, a partir del 2004, al desarrollarse nueva instrumentación, con el descubrimiento de nuevas fuentes de rayos gamma de alta y muy alta energía no observadas anteriormente en otro tipo de luz.

La astrofísica de rayos gamma es el estudio del universo a través de la luz más energética que se conoce. La luz puede contener diferente cantidad de energía, que determina su frecuencia o longitud de onda. Esta distribución de energía de la luz es a lo que se llama espectro electromagnético y está dividido en diferentes bandas o regiones, principalmente definidas por su forma de detección. La luz más energética, generada de forma natural sobre la Tierra, son los rayos gamma que emiten los materiales radioactivos. En un principio, llamar a cualquier luz con esta energía o mayor, pareció adecuado. Sin embargo, ahora que conocemos luz con millones de veces más energía que los rayos gamma terrestres, esta definición se vuelve insuficiente. Así, se ha recurrido a llamar “rayos gamma” a aquella luz que se detecta con observatorios satelitales y “rayos gamma de alta y de muy alta energía”, a aquella luz que se detecta principalmente con observatorios terrestres como HAWC (High Altitud Water Cherenkov). En este artículo; se hará referencia a rayos gamma en general, independientemente de su energía, a menos que se especifique otra cosa.

## Rayos Gamma

La luz, en general, goza de una naturaleza dual: onda-partícula. Esto quiere decir que bajo ciertas circunstancias, la luz se puede comportar como onda con características como la reflexión, pero bajo otras condiciones se comporta como partícula. Su energía es lo que determina la naturaleza predominante: mientras más energía tiene, más tiende a empaquetarse en lo que llamamos fotones, las partículas que forma la luz. Si la energía contenida en un fotón de luz visible fuera equivalente a una gota de agua, la energía de un fotón de rayo gamma de muy alta energía sería equivalente al lago de Chapultepec. Si un fotón visible se compara en energía y tamaño con la cantidad de información almacenada en un disco flexible de 3.5 pulgadas, entonces un fotón de rayo gamma de muy alta energía sería un disco del tamaño de un átomo, ¡con un almacenamiento de 3,600Tbytes!

La mayoría del universo que observamos en otras frecuencias, está dominado por procesos térmicos con temperaturas características. Por ejemplo, para radiar fotones visibles se requiere de un sistema con temperaturas de aproximadamente 6,000 grados, como la temperatura de nuestro Sol. Pero para obtener fotones de rayos gamma de muy alta energía, se requiere de una temperatura 10,000 veces mayor a la temperatura del plasma de quark y gluones, que era el estado del universo a 10 microsegundos de su creación en el Big Bang. Por ello es que es imposible tener rayos gamma de alta y muy alta energía a partir de procesos térmicos.

Los fotones no tienen carga eléctrica, por lo que no se les puede acelerar con campos eléctricos o magnéticos. Entonces, ¿cómo se produce luz de tanta energía? Por procesos no-térmicos en los que una partícula cargada con miles o millones de veces más energía, radia rayos gamma ante la presencia de campos eléctricos y magnéticos; o por procesos de aniquilación de partículas y anti-partículas pesadas, como aquellas que

conforman la materia oscura, o por reacciones nucleares en las que participan rayos cósmicos de ultra alta energía.

Otra consecuencia de la falta de carga eléctrica de los rayos gamma, es que su interacción con la materia es debida únicamente a su naturaleza corpuscular, por lo que su detección requiere de grandes cantidades de materia, ya sea con grandes volúmenes o con materiales muy densos.

Todas estas propiedades hacen que en la astrofísica de rayos gamma sea un reto el detectar esa radiación.

## **Detección de Rayos Gamma**

Como se mencionó anteriormente, por la naturaleza corpuscular de los rayos gamma es imposible usar antenas o espejos para su detección. Por otro lado, la mayoría de las técnicas de detección de partículas aprovechan su interacción con la materia debido a su carga. En el caso de los rayos gamma, su detección no puede ser de forma directa. Su interacción con la materia más probable o frecuente, es la creación de un par de partículas de materia y anti-materia: un electrón y un positrón (electrón de carga positiva), cuando siente los campos eléctricos de la materia. Es este par electrón-positrón el que permite la detección indirecta de rayos gamma.

En el caso de los rayos gamma de más baja energía, que son detectados por observatorios situados en satélites, la creación del par es inducido en un arreglo de láminas de material muy pesado. Después el par es absorbido en un calorímetro para determinar la energía de cada una de las partículas, y por lo tanto la energía del fotón original. El peso del material usado en un satélite es de algunas toneladas solamente, lo que limita la energía máxima de los rayos gamma observables.

En el caso de los rayos gamma de alta y muy alta energía, la creación del par se da en lo alto de la atmósfera, la cual, a pesar de su baja densidad, debido a su gran extensión, representa aproximadamente una masa de  $1,000 \text{ g/cm}^2$  mientras que la penetración de un rayo gamma, hasta que interacciona, es de  $30 \text{ g/cm}^2$ . El par electrón-positrón creado viaja a través de la atmósfera, radiando fotones de menor energía que la del fotón original y que producirán nuevos pares, y así sucesivamente se irán multiplicando los pares y los fotones, creando una cascada de partículas. El máximo número de partículas producidos en la cascada se da a una altitud de aproximadamente 10 km y su número dependerá de la energía del fotón original. Sólo una pequeña fracción de estas partículas llegará a la superficie terrestre al nivel del mar, mientras que las demás serán absorbidas por la atmósfera. Figura cascada-1

En el vacío, la luz viaja más rápido que cualquier partícula, pero en un medio diferente, su velocidad disminuye, dependiendo del índice de refracción del material. Así, por ejemplo, en agua la luz viaja a una velocidad 25% menor que en el vacío. En esos casos, puede haber partículas que viajen más rápido que la luz en ese medio. Cuando esto sucede, al viajar las partículas por el medio se produce luz azul por el llamado efecto Cherenkov. Esta luz no se emite en todas direcciones, sino dentro de un cono cuya apertura depende del índice de refracción del medio. En el caso del agua esta apertura es de 45 grados y en el aire es de 1 grado. Este efecto es similar a la onda de choque que produce un avión supersónico.

Los observatorios de rayos gamma de alta y muy alta energía se dividen en dos tipos: los que observan la luz Cherenkov producida en la atmósfera por la cascada de partículas del fotón original y los que observan

las partículas de la cascada directamente. Para observar estas partículas se pueden utilizar contenedores de agua, detectando la luz Cherenkov que emiten. A los primeros se les llama detectores “de luz Cherenkov atmosférica” y a los segundos “arreglos de superficie” o “de luz Cherenkov en agua”. Cada técnica tiene sus pros y sus contras. Por ejemplo, los observatorios de luz Cherenkov atmosférica pueden llegar a determinar mejor la energía y dirección del fotón original, y tienen mejor sensibilidad, pero sólo pueden trabajar en noches sin luna. Los de luz Cherenkov en agua no tienen tan buena resolución en energía, pero pueden ver todo el cielo sobre ellos y trabajar las 24 horas del día, de tal forma que son excelentes para estudiar fuentes extensas como la Vía Láctea y fuentes transitorias como los Destellos de Rayos Gamma. Estos dos tipos de instrumentos son complementarios. HAWC es un observatorio de luz Cherenkov en agua.

Ambas técnicas tienen como ruido de fondo las cascadas de partículas originadas por rayos cósmicos cargados, principalmente protones, incidentes en la atmósfera que pueden ser miles de veces más frecuentes que los rayos gamma.

## **Astrofísica de Rayos Gamma de alta y muy alta energía**

Los primeros telescopios de luz Cherenkov atmosférica se construyeron desde los años sesenta. Estos realizaron intensas campañas de búsqueda de fuentes astrofísicas de rayos gamma de alta y muy alta energía sin fruto alguno. Poco a poco fueron refinando la técnica y hubo algunas evidencias o detecciones marginales de fuentes. Pero fue hasta 1989, que el observatorio Whipple, en Arizona, logró la detección positiva de la nebulosa del Cangrejo, resultado de una supernova, que con el tiempo se ha convertido en la fuente estándar de todos los observatorios de rayos gamma de alta y muy alta energía. Durante los siguientes 15 años se descubrieron pocas fuentes nuevas, apenas una por año. Fue hasta que la nueva generación de telescopios de luz Cherenkov atmosférica, HESS (High Energy Stereoscopic System) y MAGIC (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope), a partir del 2004, probaron su singular sensibilidad para descubrir y estudiar fuentes individuales, y realizar mapas de áreas limitadas del cielo. Por ejemplo, casi un ciento de fuentes de rayos gamma de alta energía han sido descubiertas y se han determinado sus espectros. Muchas de estas fuentes están alineadas con el Plano Galáctico.

Por otro lado, el primer observatorio de luz Cherenkov en Agua, plenamente operacional y con resultados científicos, fue el observatorio Milagro, que operó desde el año 1999 hasta el 2008 en las montañas de Jemez en Nuevo México, E. U. A. Milagro mostró sus capacidades con el descubrimiento de fuentes extensas, el monitoreo del cielo y la detección de fuentes transitorias. Por ejemplo, Milagro fue el primero en hacer un mapa del 70% del cielo y en observar rayos gamma provenientes de la galaxia. Descubrió fuentes extensas de rayos gamma de muy alta energía en el plano Galáctico; determinó que existe una asimetría a gran escala de los rayos cósmicos que nos llegan a la Tierra, y descubrió dos zonas del cielo con exceso de rayos cósmicos, difíciles de explicar con las fuentes astrofísicas y los campos magnéticos conocidos hasta ahora. La segunda generación de observatorios que usan la técnica de detección de partículas por su emisión de luz de Cherenkov en agua, es HAWC.

Milagro consistió de un reservorio de agua aislado de la luz ambiental, con dimensiones de 60 m × 80 m y 8 m de profundidad, con dos capas de fototubos o fotosensores, complementado por un arreglo de 175 pequeños tanques de agua auxiliares, cada uno dotado de un fototubo. La función principal de la capa superior de fototubos era determinar la dirección de la partícula primaria, mientras que la función de la capa inferior era la discriminación de cascadas producidas por un rayo cósmico cargado de una producida por una gamma. Los tanques auxiliares permitían estimar el centro y las dimensiones de la cascada, mejorando

la resolución angular y la discriminación de hadrones. Las dimensiones, diseño y ubicación de MILAGRO fueron fijados por la infraestructura existente en el sitio en Nuevo México. HAWC sigue un diseño optimizado, tomando en cuenta lo aprendido en MILAGRO.

## El observatorio HAWC

HAWC es el acrónimo de “High Altitude Water Cherenkov”, ya que HAWC Figura: HAWC será un observatorio situado a gran altitud y basado en la detección de las partículas de las cascadas, mediante la emisión de luz Cherenkov en agua. El concepto de un observatorio como HAWC fue concebido en el año 2005 como un reservorio de agua de 300 x 300m de área y 8m de profundidad, con 11,250 fotosensores en dos capas, a las profundidades de las de Milagro y a una altitud por arriba de los 4,500 metros sobre el nivel del mar. La finalidad era mejorar notablemente la sensibilidad a rayos gamma de baja energía. Sin embargo, el proyecto era económicamente muy costoso y con el tiempo, y los resultados de Milagro, se entendió que el nicho científico de HAWC estaba en la observación de rayos gamma de muy alta energía.

La búsqueda de un sitio a una altitud por arriba de los 4,000 m, que albergará HAWC, comenzó en el 2005. Varios sitios compitieron por albergar a HAWC: Chacaltaya en los Andes Bolivianos y el Tibet en China; sin embargo, el volcán Sierra Negra fue seleccionado en el año 2007 gracias a que el grupo de científicos mexicanos interesados en HAWC tienen una gran solidez y experiencia en proyectos similares de gran complejidad, como el observatorio de rayos gamma Milagro, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN en Suiza, y el observatorio de rayos cósmicos Auger, en Argentina. Figura colaboración-sitio-hawc-2008040040

Hacia finales del año 2008 se recibió financiamiento parcial para construir un prototipo de HAWC y resolver problemas logísticos asociados a la altitud del sitio y el nuevo diseño, que incluía contenedores o tanques de agua. En Marzo del 2009 se observaron los primeros rayos cósmicos con el prototipo.

## El sitio

El sitio de HAWC está dentro del Parque Nacional Pico de Orizaba, conformado por dos volcanes: el más alto de México, Citlaltépetl o Pico de Orizaba, con una altura de 5,610m, y el volcán Sierra Negra, con una altura de 4,600m, a unos 7km del Citlaltépetl en la dirección sur poniente. HAWC estará localizado a una altitud de 4,100m, en las faldas del volcán Sierra Negra, a una latitud de 18°59'41"N y longitud 97°18'28". Figura: volcanes.

La latitud de Sierra Negra permite un 15% más de visibilidad de la esfera celeste que veía Milagro. La nebulosa del Cangrejo pasa a 3° del zenit y será observado por HAWC por casi 6 horas cada día, permitiendo calibrar el observatorio diariamente. La región del Cisne y el centro de la galaxia pasarán a 20° y 48° del zenit, respectivamente.

En la cima del volcán Sierra Negra se encuentra el Gran Telescopio Milimétrico (GTM), cuya construcción requirió el desarrollo de la infraestructura de Sierra Negra, tal como un camino, fibra óptica y energía eléctrica. Esta infraestructura ha atraído a otros proyectos al sitio, como el Monitor de Neutrones Solares, el Radiotelescopio Solar (RT5), el Observatorio Mexicano de Rayos Gamma (OMEGA), un arreglo de tanques para la observación de rayos cósmicos y una estación sismológica. Algunos de estos proyectos están aún en construcción. Todos estos proyectos conforman el Consorcio Sierra Negra, junto con HAWC y el GTM.



El sitio de HAWC está suficientemente cerca del ecuador para tener condiciones climatológicas benignas para en estas altitudes. La temperatura media es de 4.3° con temperaturas bajo cero sólo el 5% del tiempo, principalmente durante el invierno. La velocidad media del viento, estimada a partir de medidas en la cima del volcán es de 4m/s. Valores por arriba de 10m/s son raros.

## El diseño y funcionamiento de HAWC

HAWC será un arreglo de 300 contenedores de agua pura de 7.3 metros de diámetro y 5m de alto. Figura: Imagen 1. Cada contenedor con tres fotosensores Figura: pmt-robot en su base mirando hacia arriba. Este arreglo abarcará un área equivalente de 150m x 150m. Con este diseño, HAWC será 15 veces más sensible que su antecesor. Este diseño modular, que permite agregar contenedores según diferentes esquemas de financiamiento, posibilita además comenzar a hacer ciencia cuando se alcanza la sensibilidad de su antecesor, mucho antes de que se acabe de construir el observatorio total.

La cascada de partículas, generada por la interacción de un rayo gamma con los átomos de la atmósfera, viaja a velocidades cercanas a la velocidad de la luz. La mayoría de las partículas no se desvía mucho de la dirección original, formando el centro de la cascada. Pero otras partículas van abriéndose, formando un frente de onda con una superficie curva. Esta superficie llegará al arreglo de tanques en diferentes lugares a diferentes tiempos. Este patrón de tiempos nos definirá la dirección perpendicular de la superficie curva y la distribución de luz Cherenkov en el arreglo nos determinará la posición del centro de la cascada. Con esta información se reconstruirá la dirección del rayo gamma original, lo que permite hacer astronomía, determinando la posición de las fuentes de esta radiación.

Como se mencionó anteriormente, los rayos cósmicos cargados también producen cascadas de partículas cuando interaccionan con la atmósfera terrestre. La diferencia es que estas cascadas también contienen muones, partículas altamente penetrantes que tienden a producir más cantidad de luz Cherenkov en los contenedores que cruzan. La identificación de estos muones es la base para diferenciar las cascadas de rayos cósmicos cargados de las de rayos gamma.

Este diseño de HAWC resulta en un instrumento 15 veces más sensible que Milagro. Básicamente el aumento en sensibilidad se logra por la mayor altitud del sitio, por el incremento del área física y por el aislamiento óptico de los fotosensores. Por un lado, la energía mínima de los rayos gamma, que podrá observar HAWC, se reduce con el aumento de la altitud. Esto es principalmente porque hay 6 veces más partículas en las cascadas observadas a 4,100m que a 2,630m (altitud de Milagro). El incremento en área se ve reflejado en una mejor resolución angular, ya que se puede determinar mejor la curvatura del frente de la cascada y la localización de su centro. El aislamiento óptico decrece el número de fotosensores disparados por luz, viajando horizontalmente en el detector, lo que permite una mejor resolución angular, especialmente para los rayos gamma menos energéticos. La discriminación de cascadas de rayos cósmicos se mejora con el aumento de área, ya que aumenta la probabilidad de detectar sus muones.

HAWC, además de ser un observatorio de rayos gamma de muy alta energía, también será un observatorio de rayos cósmicos cargados. El éxito de HAWC está fuertemente respaldado por la operación exitosa y los resultados científicos del experimento MILAGRO.

## Ciencia de HAWC

El universo observado en rayos gamma de alta energía muestra las regiones más violentas de nuestra galaxia y de galaxias más alejadas. Estos procesos son extremadamente energéticos y por lo tanto de corta duración. En ciertos casos ocurren en regiones con los campos magnéticos o gravitacionales más intensos, que se conocen como en pulsares, magnetares Figura: Magnetar-1 y hoyos negros supermasivos. Otros son producidos por el material eyectado en explosiones de supernovas, cuando a una estrella masiva se le acaba el combustible y muere. También colisiones entre estrellas de neutrones o entre hoyos negros, producen rayos gamma de muy alta energía.

Las metas científicas de HAWC incluyen:

- 1.- La elaboración de un mapa del la emisión difusa de rayos gamma de muy alta energía de la Galaxia. Esta emisión determina el flujo de rayos cósmicos y su distribución energética en la Galaxia. Zonas con mayor emisión que la predicha, por la interacción de rayos cósmicos con la materia, probablemente serán zonas de aceleración de rayos cósmicos.
- 2.- Determinar el espectro de los rayos gamma de muy alta energía, de fuentes astrofísicas en la Galaxia, para determinar si son o no fuentes de rayos cósmicos galácticos.
- 3.- Elaboración de un mapa del cielo en rayos gamma de alta energía, para monitorear fuentes conocidas y descubrir nuevas clases de fuentes de emisión difusa y puntual de rayos gamma de alta energía.
- 4.- Monitoreo de Centros Activos de Galaxias que no son observados en otras longitudes de onda. Observaciones multi-frecuencia de sus ráfagas, ponen a prueba el ambiente de los agujeros negros supermasivos, restringiendo los modelos de producción de rayos gamma de muy alta energía y los procesos de aceleración de partículas cargadas.
- 5.- Monitoreo del cielo para detectar la emisión temprana de rayos gamma de Destellos de Rayos Gamma.
- 6.- Estudio de la anisotropía local de rayos cósmicos para entender los mecanismos que la generan.

## El prototipo de HAWC

Para cristalizar el sueño de observar el universo más energético y violento, ha sido indispensable el apoyo y el trabajo conjunto de once instituciones mexicanas que son lideradas por los Institutos de Astronomía y Física de la UNAM y el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

En 2008; se recibió un financiamiento parcial de la National Science Foundation, la Universidad de Maryland, el Conacyt, la SEP, la UNAM, el INAOE: y la Universidad Autónoma de Chiapas, para hacer los estudios de factibilidad, detalles del diseño y resolver los problemas logísticos relacionados con el sitio y su altitud.

Entre Noviembre de 2008 y Febrero de 2009 se instaló un prototipo de HAWC, compuesto por 3 tanques. Video: P1050637 de 28,000 litros de agua cada uno y fotodetectores extremadamente sensibles a la luz Figura: colocando-pmt-1. El prototipo está ubicado a 4,530 metros de altura, a un kilómetro del sitio definitivo que ocupará HAWC y muy cerca del Gran Telescopio Milimétrico, esto para aprovechar su infraestructura. Paralelamente se gestionaron las autorizaciones para la construcción del nuevo camino al sitio definitivo y la adecuación de la localidad.

En Marzo del 2009 el prototipo detectó los primeros rayos cósmicos cargados Figura: Sky. Estas lecturas permitieron construir un primer mapa del cielo, lo que:

- Pone a prueba la tecnología implementada y su correcto funcionamiento,
- Demuestra la experiencia de los científicos mexicanos, y
- Motiva a las agencias, entidades e instituciones involucradas en el financiamiento definitivo del proyecto, al recibir resultados positivos, confiables y trascendentales.



En septiembre de 2009 se comenzó la construcción del observatorio, con un arreglo de tanques en el sitio definitivo, en cuatro etapas progresivas: de 7, 30, 100 y 300 tanques. Con los primeros 30 tanques será posible hacer estudios y observaciones de gran impacto científico, que convertirán a HAWC en el Observatorio Rayos Gamma más avanzado en el mundo.

### **Instituciones participantes en HAWC**

Instituto de Astronomía, UNAM, México  
Instituto de Física, UNAM, México  
Instituto de Geofísica, UNAM, México  
Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, México  
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, México  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México  
Universidad Autónoma de Chiapas, México  
Universidad de Guadalajara, México  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México  
Centro de Investigación y Estudios Avanzados, México  
Universidad de Guanajuato, México  
University of Maryland, E. U. A.  
Los Alamos National Laboratory, E. U. A.  
University of Utah, E. U. A.  
University of California – Irvine, E. U. A.  
Michigan State University, E. U. A.  
George Mason University, E. U. A.  
University of New Hampshire, E. U. A.  
Pennsylvania State University, E. U. A.  
University of New Mexico, E. U. A.  
Michigan Technical University, E. U. A.  
NASA / Goddard Space Flight Center, E. U. A.  
Georgia Institute of Technology, E. U. A.  
University of Wisconsin, E. U. A.  
Harvey Mudd College, E. U. A.

### **Conclusión**

A 400 años de que Galileo utilizó por primera vez un instrumento para observar el firmamento, se está construyendo en México un observatorio radicalmente diferente que registrará los rayos gamma de más alta energía con contenedores de agua, fotón a fotón, que permitirá observar los procesos más violentos de un universo cambiante.

### **Referencias**

Schofelder, Bolker. The universe in gamma rays. Springer. 2001.  
Wicks, Trevor. Very High Energy Gamma-Ray Astronomy. Bristol. 2003.  
<http://hawc.umd.edu>  
<http://www.hawc.unam.mx>  
<http://www.inaoep.mx/hawc>