



# Gran estreno. Hoy presentamos HAWC, con la presencia de rayos gama y rayos cósmicos

W. LUIS MOCHÁN

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM  
Academia de Ciencias de Morelos

**P**óngase de acuerdo con trescientos de sus vecinos. Sincronicen sus relojes. Tome aire, mucho, y sumérjase en su tinaco. Asegúrese que quede bien cerrado; no deje abierto resquicio alguno por donde pudiera filtrarse ni un débil haz luminoso. No se mueva, el agua no debe agitarse. Espere media hora para que sus ojos se acostumbren totalmente a la obscuridad; claro, sin respirar. Ponga atención. ¿Vio ese destello luminoso? ¿Ese otro? ¿No? Si pone

atención podrá ver unos diez mil destellos cada segundo. Ahora anote cuidadosamente la hora en que ve cada destello. Sí, anote la hora, el minuto, el segundo, el milisegundo, el microsegundo y el nanosegundo correspondiente a cada destello. Más tarde compararemos los resultados con los de sus trescientos vecinos. ¿Que su reloj no mide nanosegundos? ¿Que sus vecinos no están buscando destellos dentro de sus tinacos? ¿Que de qué se trata todo esto? Intentaba que usted, y sus vecinos me ayudaran a armar en sus azoteas un telescopio de rayos gama y rayos cósmicos, pero mejor salga

del tinaco, séquese y déjeme contarle sobre lo que vi el viernes pasado. (Por si no le pareciera obvio, permítame recomendarle al lector que *no* intente meterse a su tinaco; es dañino para la salud.) Primero, permítame informarle que estamos siendo bombardeados. No me refiero a misiles ni bombas; no me refiero tampoco a la insostenible propaganda política y publicidad comercial que satura nuestros medios y aturde nuestras mentes. Me refiero a las partículas ultraenergéticas que se producen en supernovas, grandes explosiones que acompañan la muerte de estrellas masivas, y en los núcleos de las galaxias, la Vía Láctea incluida, e incluso, como resultado de la evaporación de hoyos negros. Estas partículas incluyen protones y núcleos atómicos, los cuales chocan con átomos y moléculas en la atmósfera terrestre produciendo piones, muones, neutrinos, electrones y positrones (antielectrones) que a su vez pueden tener más colisiones produciendo aún más partículas, que forman un chorro que se propaga con una velocidad cercana a la velocidad de la luz: trescientos mil kilómetros cada segundo. Muchas de estas partículas llegan a la superficie de la Tierra, traspasan el techo de nuestras viviendas, pasan a través de nuestros cuerpos (no se

preocupe, siempre lo han hecho) y penetran en el suelo bajo nuestros pies. Entre las *partículas* que llegan a nuestra atmósfera desde los confines del Universo también se encuentran rayos gama, radiación electromagnética como la luz, o como las ondas de radio, pero con longitud de onda muchos órdenes de magnitud menor. Me explico, la luz es una onda electromagnética, una oscilación del campo eléctrico y magnético que se propaga a través del espacio vacío así como se propagan las olas en un estanque al que arrojamamos una piedra, pero con una velocidad enorme. La frecuencia de oscilación de la luz que pueden ver nuestros ojos va de 400 THz (1 THz (*terahertz*) significa un millón de millones de oscilaciones cada segundo) para la luz roja a 790 THz para luz violeta, mientras que para los rayos gama es mayor o *mucho mayor* a 2.5 EHz (1 EHz (*exahertz*) es un millón de THz). La longitud de onda es la distancia entre una de sus crestas y la siguiente, y para la luz visible mide entre 390 y 700 nm (1 nm (*nanómetro*) es la millonésima parte de un milímetro); para los rayos gama ésta mide menos o mucho menos que el tamaño de un átomo (0.1nm). A diferencia de la descripción que haríamos de una onda en un estanque, la luz está *cuantizada*, está formada por partículas llama-



**1. Observatorio HAWC constituido por trescientos tanques llenos con doscientas toneladas de agua c/u y con cuatro fotomultiplicadores colocados en su interior.**



**2. Parte del cuarto de control donde se reciben las señales de los 1,200 fotomultiplicadores, se procesan, cronometran, discriminan, filtran y guardan. El equipo de cómputo debe guardar un terabyte de información cada día.**

das *fotones*, cada uno de los cuales tiene una energía específica asociada a su color. Los fotones rojos tienen una energía de alrededor de 1.65 eV (1 eV (*electron-volt*) es la energía que ganaría un electrón al atravesar el espacio entre dos placas entre las que hay un voltaje de un volt) y los violetas tienen una energía de hasta 3.26 eV. Como referencia, considere el lector que la energía vibracional que tiene cada átomo debido a su temperatura es alrededor de 100 veces menor.

**CENTRO DE ESPECTÁCULOS**

...Y cualquier otro evento *Social* que se te OCURRA

[www.ezenza.com.mx](http://www.ezenza.com.mx)

Yucatán 12 • Col. Vista Hermosa      Informes: 279 14 06 • 312 22 44 • 312 14 14

## ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS, A.C.

¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTÁCTANOS: editorial @acmor.org.mx



## Rayos cósmicos ultraenergéticos



Un fotón gama puede tener una energía de 100kV (cien mil eV) o incluso, mucho mayor; se han observado rayos gamas de decenas y cientos de TeV (i.e., tera electronvolts) que estamos seguros que no son producidos en el Sol ni en la vecindad del sistema solar, y se han reportado observaciones de fotones de hasta  $10^{21}$  eV. No sabemos bien de donde vienen ni cómo se producen. Hay varias teorías para rayos gama de distintas energías,



3. Vista del Pico de Orizaba desde el observatorio.

análisis de datos. Todos estos sofisticados tinacos se hallan colocados en una red triangular en un área de alrededor de 30,000 m<sup>2</sup> en un lugar bellissimo que podríamos considerar la *azotea* del país, a 4,100m de altura sobre el nivel del mar en la Sierra Negra de Puebla en la vecindad de su montaña más alta, el pico de Orizaba (figura 3).



5. Registro de un evento unos minutos después de inaugurado el observatorio. Se muestra mediante círculos la posición de los tanques y de sus detectores. El color codifica el tiempo de llegada de señales y el tamaño la intensidad de dichas señales.

pero hay que ponerlas a prueba y para eso tenemos que estudiarlos, observarlos y registrarlos.

El 20 de marzo de 2015 fue un día de fiesta nacional, o si no, debió haber sido; se inauguró en México el observatorio más avanzado del mundo para detectar rayos gama procedentes de los eventos más violentos del universo, así como rayos cósmicos. El observatorio, conocido como HAWC por sus siglas en inglés (*High Energy Water Cherenkov*) es una especie de telescopio que permite hacer mapas del universo tal como lo verían nuestros ojos si pudiéramos ver rayos gama, pero es un telescopio de lo más extraño. Consiste en trescientos tanques llenos de agua (ver figura 1) en cada uno de los cuales hay cuatro fotomultiplicadores conectados mediante circuitos ópticos y electrónicos a un sistema de adquisición de datos y un cúmulo de computadoras (figura 2) para el

Este observatorio representa una colaboración entre el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE), los institutos de Astronomía (IA), Ciencias Nucleares (ICN), Física (IF), Geofísica (IGeof-UNAM) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) y otras 7 instituciones nacionales, así como las universidades de Maryland, Michigan, Rochester, Madison, Colorado, Ohio y otras 27 instituciones educativas y de investigación en Estados Unidos y una en Europa. Fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), la UNAM y la BUAP por parte de México, y por la *National Science Foundation*, el *Department of Energy*, el laboratorio nacional *Los Alamos* y otras instituciones en Estados Unidos, con un costo total de alrede-

dor de 15 millones de dólares. Pero ¿cómo puede funcionar un telescopio hecho de tanques de agua? Al igual que los rayos cósmicos, al llegar a la atmósfera los rayos gama producen chorros de partículas cargadas que se mueven en una dirección cercana a la dirección del rayo gama inicial, a una velocidad muy cercana a la de la luz en el vacío. Estas partículas constituyen una *radiación* muy penetrante que puede atravesar la atmósfera terrestre y pasar de un lado a otro de cuerpos sólidos. Alguna de estas partículas podría traspasar la cubierta de alguno de los muchos tanques de agua. La velocidad de la luz en el agua es un poco mayor a 200,000 km por segundo, enorme pero mucho menor que su velocidad en el vacío. Por lo tanto, la partícula viajaría *más rápido que la luz en el medio*, serían localmente *superluminales*. Cuando un ion viaja más rápido que la luz en el medio que atraviesa se produce un efecto análogo al que acontece cuando un avión viaja más rápido que el sonido. En el caso del avión se forma una onda de choque, una región cónica en que la presión se incrementa enormemente y que percibimos como si hubiera una explosión poco después de que el avión pasa sobre nuestras cabezas. Algo similar sucede con la punta de un látigo cuando se le hace tronar. La onda de choque producida por un avión puede romper los vidrios de nuestras ventanas y provocar otros destrozos, y por eso los vuelos supersónicos suelen prohibirse en la vecindad de zonas habitadas. En el caso de un ion superluminal, en lugar de una onda de choque acústica, se produce un cono de radiación luminosa llamada *radiación Cherenkov*. Alguno de los fotones Cherenkov podría llegar a alguno de los fotomultiplicadores anclados en el fondo del tanque, arrancando un electrón a un electrodo. Este electrón es acelerado por un campo eléctrico intenso hacia otro electrodo, con el que choca, arrancándole muchos electrones, cada uno de los cuales se acelera a su vez en un proceso que se repite multiplicando el número de electrones hasta formar una señal eléctrica que puede convertirse en un pulso de luz que se envía a una computadora a través de fibras ópticas (figura 4) donde se registra la hora de llegada con una resolución de ns (1 ns (*nanosegundo*) es una milésima de millonésima de un segundo).

La idea que es sorprendente por sencilla es que al tener muchos tanques de agua, podemos comparar el tiempo de llegada de los pulsos que provienen de cada uno con los tiempos correspondientes a los demás. Si, por ejemplo, llegara un rayo cósmico dirigiéndose hacia abajo verticalmente desde el zenit (es decir, desde el cielo arriba de nuestra cabeza), todas las partículas del chorro correspondiente

llegarían a la tierra simultáneamente y por lo tanto, distintos tanques las registrarán *al mismo tiempo*. Si en cambio el rayo gama llegara desde el oriente, los tanques de ese lado oriente recibirían la radiación *antes* y los del lado poniente *después*. La luz recorre 30 cm cada ns, por lo que, sabiendo la posición de cada detector y cuánto tardó en detectar una partícula de un chorro, se puede *calcular* la dirección de donde provino el mismo.

La figura 5 muestra una imagen para visualizar uno de los primeros pulsos captados después de inaugurado el observatorio. Cada círculo delgado corresponde a un tanque de agua. En cada tanque se observan cuatro círculos cuyo tamaño es proporcional a la cantidad de luz que recibió cada uno de sus 4 detectores. El color de dichos círculos codifica el tiempo transcurrido. Esta imagen muestra que los tanques hacia el oeste-suroeste (círculos azules) recibieron un pulso unos 300 ns antes que los del extremo este-noreste (rojos), por lo que el retraso total corresponde a una distancia de 90m. La distancia entre el primer y último tanque es de 180m por lo que, con un poco de trigonometría podemos concluir que el fotón gama responsable de este evento provenía de un punto en el cielo a unos 30 grados desde el zenit hacia el oeste-suroeste. El tamaño del pulso eléctrico producido en cada detector y el número de detectores que se activan en un evento da información sobre el tamaño del evento y de la energía del rayo gama que lo inició. Para construir el observatorio fue necesario resolver una serie de problemas técnicos e integrar el proyecto con la sociedad. Se decidió ensamblar láminas formando grandes cilindros metálicos. Para evitar accidentes, los tanques se armaron de arriba hacia abajo, comenzando por su techo, y fueron elevándose conforme se terminaba cada nivel. Cada tanque fue forrado por dentro con una tela y en su interior se colocó una *vejiga*, la cual se debió llenar, sin que se picara, con casi 200,000 litros de agua, con un peso de 200 toneladas, los



6. Dibujos preparados por niños de los alrededores del observatorio explicando su funcionamiento e ilustrando los fenómenos cósmicos que serán investigados.

cuales tuvieron que ser transportados mediante decenas de miles de viajes de *pipas* y luego fueron filtrados, esterilizados y desmineralizados, pues deben durar sin recambio unos once años. Tu vieron que idear un mecanismo para fijar y poder dar mantenimiento a los fotomultiplicadores en posiciones precisas dentro de cada tanque, desde luego, sin perforar la vejiga. Para evitar la desconfianza de la población circundante, se les ha invitado a visitar las instalaciones y se han realizado eventos en que se ha explicado el propósito del proyecto. La figura 6 muestra, alternando con una exposición de carteles elaborados por científicos del proyecto, dibujos preparados por estudiantes de las poblaciones de Texmalaquilla y Atzitzintla mostrando su comprensión del proyecto y de su importancia. Seguramente, de entre estos alumnos surgirán grandes científicos fuertemente motivados por este proyecto.

Agradecimiento

Esta publicación fue apoyada por DGAPA-UNAM (IN108413). Agradezco la invitación del INAOE y el IFUNAM para participar en la inauguración del HAWC.



4. Fibras ópticas (cables anaranjados) que llevan pulsos luminosos producidos por un láser (al fondo en el centro) para calibrar el sistema de fotodetectores, los cuales envían señales optoelectrónicas al cuarto de control cada vez que captan fotones Cherenkov en los tanques de agua.