

# Rayos cósmicos ultraenergéticos: el Observatorio Pierre Auger



En el proyecto Pierre Auger, que busca desentrañar los misterios de los rayos cósmicos ultraenergéticos, participa de forma directa y desde 1996 un grupo de investigadores mexicanos provenientes de cuatro instituciones.

**Humberto Salazar Ibargüen  
y Luis Manuel Villaseñor Cendejas**

Los rayos cósmicos son las partículas subatómicas con las mayores energías detectadas hasta ahora en el Universo. Constituyen un misterio científico, pues desconocemos su naturaleza, origen y mecanismo de producción. El Observatorio Pierre Auger contribuirá a aclarar este misterio.

## INTRODUCCIÓN

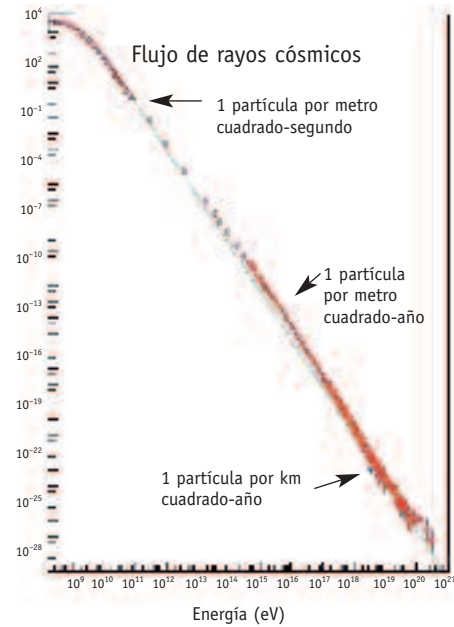
Los rayos cósmicos son partículas que llegan constantemente a la Tierra provenientes del espacio exterior, y son imperceptibles para el ojo humano. Los de más bajas energías provienen del Sol y de otras estrellas cercanas. Otros más energéticos pueden provenir del centro de la galaxia, de explosiones de estrellas o de otros efectos violentos en la galaxia. Existe cierta

evidencia de que los de mayor energía son producidos en cataclismos astrofísicos fuera de la Vía Láctea. Su flujo disminuye rápidamente a medida que aumenta su energía, como se puede ver en la Figura 1; pasan de centenas de partículas por metro cuadrado por estereorradián por segundo, para los de bajas energías (alrededor de  $10^9$  electronvolts –un 1 seguido de nueve ceros), hasta flujos 30 órdenes de magnitud menores para los de energías superiores a  $10^{20}$  electronvolts. Estas últimas energías, equivalentes a decenas de calorías son sorprendentes, al tomar en cuenta que son las partículas individuales con mayores energías detectadas en el Universo.

Los primeros eventos de rayos cósmicos con energías superiores a  $10^{20}$  electronvolts, llamados ultraenergéticos, se detectaron en la década de los sesenta (Clay y Dawson, 1997). Desde entonces media docena de observatorios distribuidos alrededor del mundo, que usan técnicas muy diferentes entre sí, han detectado cerca de dos docenas de eventos independientemente, por lo que la existencia de estos eventos es un hecho irrefutable.

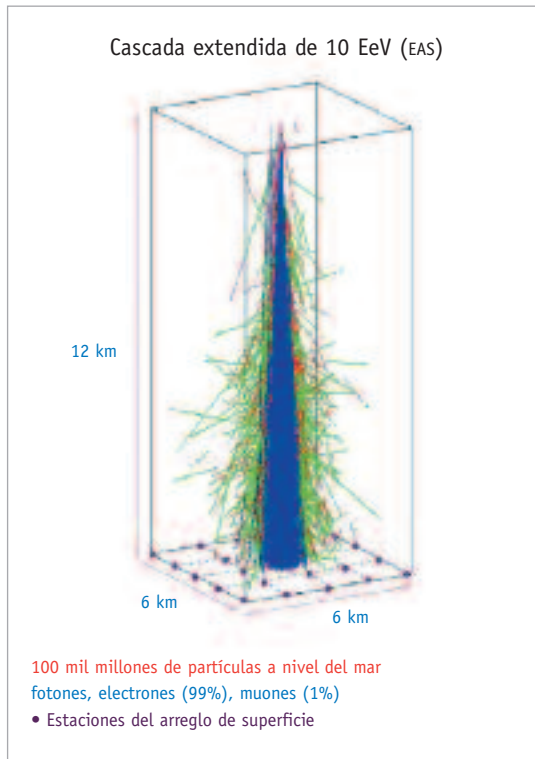
Los rayos cósmicos ultraenergéticos constituyen un misterio digno de explorarse con cuidado. En efecto, actualmente ignoramos no sólo qué mecanismo utiliza la naturaleza para acelerar estas partículas hasta energías 100 millones de veces mayores que las máximas energías logradas en los laboratorios terrestres, sino también dónde se encuentran esos aceleradores cósmicos y cuáles son las partículas aceleradas.

Las propiedades de los rayos cósmicos ultraenergéticos se han medido a través de la detección de las cascadas atmosféricas extendidas que originan las partículas primarias al interactuar con los núcleos de nitrógeno y oxígeno de la atmósfera terrestre, a decenas de kilómetros de altura (ver Figura 2). Esta interacción origina un chubasco de partículas secundarias que a su vez producen luz fluorescente al interactuar con las moléculas de la atmósfera. Un primer método de detección consiste en captar la luz de fluorescencia mediante telescopios que sólo operan de noche. Un segundo método consiste en registrar el chubasco, usando detectores de partículas esparcidos sobre la superficie terrestre. Los dos observatorios que operan actualmente son llamados HiRes ([www.cosmic-ray.org](http://www.cosmic-ray.org)) y AGASA ([www.akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA](http://www.akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA)). El Observatorio HiRes, situado en Estados Unidos, utiliza el primer método, mientras que AGASA, localizado en Japón, utiliza el segundo. Sin embargo, las observaciones reportadas por ambos observatorios están en desacuerdo en sus mediciones de energía en alrededor de un 20 por ciento; esto origina también un desacuerdo en cuanto al número de eventos con energías superiores a  $10^{20}$  electronvolts que cada laboratorio reporta. El Observatorio Pierre Auger (Cronin, 2001; Bluemer, 2003; Auger Coll, 2003) es un esfuerzo internacional ([www.auger.org](http://www.auger.org)) cuyo objetivo principal es estudiar los rayos cósmicos ultraenergéticos con un detalle sin precedente, superando por mucho la capacidad de detección de estos dos observatorios. Además de contar con una área de detección 30 veces mayor que la de AGASA, el observatorio Auger usa ambos métodos de detección para obtener una alta precisión en la determinación de la dirección de arribo y de la energía de los rayos cósmicos, por lo que sin duda contribuirá a resolver de una vez por todas la controversia observacional actual. Asimismo, el Observatorio Pierre Auger nos permitirá saber qué partículas están



**Figura 1.** Mediciones del espectro diferencial de rayos cósmicos. La línea punteada representa la función  $E^{-3}$ . En texto se dan los valores aproximados de flujos integrales para tres energías diferentes.





**Figura 2.** Simulación de un protón cósmico de alta energía ( $10^{19}$  electronvolts) que incide sobre la atmósfera de la Tierra. Al chocar con los núcleos de las moléculas del aire da origen a una cascada de partículas subatómicas que viajan a través de la atmósfera y que al llegar al suelo pueden cubrir una área de varios kilómetros cuadrados.

Cada uno de los dos sitios del Observatorio Pierre Auger contará con un gigantesco arreglo de detectores de superficie y cuatro detectores de fluorescencia

involucradas, debido a que fue diseñado para lograr una mejor separación estadística de las cascadas atmosféricas originadas por diferentes partículas primarias: núcleos pesados, protones, rayos gamma y neutrinos.

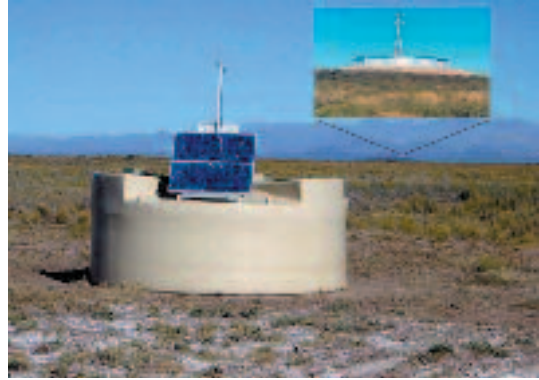
## DESCRIPCIÓN DEL OBSERVATORIO PIERRE AUGER

El proyecto fue iniciado por el profesor James W. Cronin, premio Nobel de física en 1980, quien por cierto ha visitado México en varias ocasiones. En esta colaboración internacional participan actualmente cerca de 180 científicos de 19 países ([www//auger//org//arDIAGcnetificoDIAGPGSDIAGcolab\\_intDIAGcolabint//html](http://www//auger//org//arDIAGcnetificoDIAGPGSDIAGcolab_intDIAGcolabint//html)). El observatorio completo constará de dos sitios, uno en el hemisferio norte y el otro en el sur. Actualmente se está construyendo el observatorio del sur en la provincia de Mendoza, Argentina. Este sitio es especialmente interesante debido a que hará posible la exploración de una parte del cielo que no ha sido explorado aún con este tipo de instrumentos, con una vista preferencial al centro galáctico, incluyendo fuentes potenciales y distribuciones de materia que no se pueden ver desde el norte. El plan es terminar el observatorio del sur para finales de 2005.

Cada uno de los dos sitios del Observatorio Pierre Auger contará con un gigantesco arreglo de detectores de superficie y cuatro detectores de fluorescencia. Los detectores de superficie medirán la distribución lateral y temporal de las partículas de la cascada a nivel del suelo, mientras que los detectores de fluorescencia medirán el desarrollo longitudinal de la cascada en la atmósfera por encima del arreglo de superficie. En total habrá mil 600 detectores de superficie espaciados 1.5 kilómetros unos de otros, en una distribución triangular sobre una área de 3 mil kilómetros cuadrados. Cada uno de estos detectores, llamados también detectores Cherenkov de agua (ver Figura 3), está constituido por un tanque cilíndrico de polietileno de 3.6 metros de diámetro y de 1.65 de altura, lleno con 12 toneladas de agua filtrada contenida en el interior de una bolsa hecha con un material altamente reflectivo. Las partículas cargadas que llegan al suelo producen luz al atravesar el agua debido al llamado efecto Cherenkov; esta luz es detectada mediante tres fototubos instalados en la parte superior dentro de cada tanque detector. Los detectores de superficie operan con alimentación solar, y se comunicarán con una estación central usando conexiones de radio. La dirección de arribo de los rayos cósmicos primarios se obtiene a través de la medición precisa del tiempo de llegada de las partículas que van al frente de las cascadas a cada de-

lector de superficie; este tiempo se mide con precisión de nanosegundos, mediante un receptor del sistema satelital de posicionamiento global montado en cada detector. Los detectores de fluorescencia consisten en cuatro ojos (ver Figura 3) en la periferia del arreglo de superficie con 6 telescopios cada uno. A su vez, cada telescopio consta de un conjunto de 440 fototubos montados sobre una placa situada en el plano focal de un espejo de 3.4 metros de radio de curvatura. El campo visual de cada telescopio es de 30 grados en ángulo azimutal, por 30 grados en ángulo cenital.

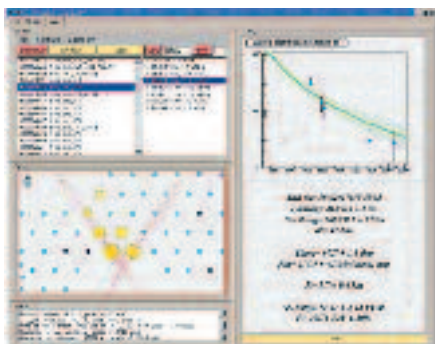
La composición del rayo cósmico primario se puede medir a través de dos parámetros: la posición del máximo en el número de partículas en la cascada a lo largo de su perfil longitudinal, medido por los detectores de fluorescencia, y el contenido de muones en la cascada al llegar al suelo, medido por los detectores de superficie. Como ya mencionamos, el flujo de rayos



**Figura 3.** Detector Cherenkov del arreglo de superficie instalado en el Observatorio Pierre Auger en la provincia de Mendoza, Argentina. Al fondo a la derecha y en el inserto se ve el edificio “Los Morados”, que alberga uno de los cuatro detectores de fluorescencia.



El observatorio del sur terminará de construirse a finales del 2006, con un costo de aproximadamente 50 millones de dólares, de los cuales México habrá aportado cerca del 2.5 por ciento en componentes fabricados en la industria mexicana



**Figura 4.** Ejemplo de un evento de alrededor de  $2 \times 10^{19}$  electronvolts detectado en modo híbrido por el Observatorio Pierre Auger del Sur. La figura de la izquierda muestra los seis detectores de superficie activados, con el tamaño del círculo amarillo proporcional al número de partículas captadas por cada uno; las líneas punteadas corresponden a la dirección hacia cada uno de los dos telescopios de fluorescencia que simultáneamente detectaron el evento; el punto de intersección corresponde al centro del chubasco al chocar con el suelo. La figura de la derecha muestra el desarrollo longitudinal del chubasco, es decir, el número de partículas detectadas en cada detector de superficie como función de la distancia al centro del chubasco; la línea continua representa un ajuste a los valores medidos. En la parte inferior derecha se muestran los valores de la dirección y la energía medidos para este evento.

cósmicos ultraenergéticos es muy pequeño; por ejemplo, arriba de  $10^{19}$  electronvolts llega sólo uno por kilómetro cuadrado por estereorradián por año, mientras que arriba de  $10^{20}$  electronvolts llega sólo uno por  $\text{km}^2$  por estereorradián por siglo. Este flujo tan pequeño requiere que cada sitio del observatorio tenga un gran poder de captación; este parámetro de diseño recibe el nombre técnico de *apertura* y tendrá un valor de 7 mil 400 kilómetros cuadrados por estereorradián para cada sitio. Esta apertura tan grande se traduce en que el número de eventos esperados en cada sitio para un ángulo cenital menor de 60 grados, será de 3 mil por año para energías superiores a  $10^{19}$  electronvolts, y aproximadamente 100 veces menor para eventos con energías por encima de  $10^{20}$  electronvolts.

La etapa de diseño del Observatorio Pierre Auger empezó en febrero de 1995, y terminó en 1999; le siguió la etapa de construcción del observatorio del sur, que empezó en marzo de 1999. Hasta mediados del 2005 se han instalado ya 740 detectores de superficie y 18 telescopios de fluorescencia; con estos detectores parciales se han detectado ya decenas de miles de eventos con energías mayores a  $10^{19}$  electronvolts, incluyendo miles de estos eventos registrados en modo híbrido, es decir, detectados por al menos un detector de fluorescencia y por varios detectores de superficie al mismo tiempo (ver Figura 4), haciendo posible que el Auger sea el primer observatorio en medir la energía de los rayos cósmicos ultraenergéticos en forma independiente de simulaciones de Monte Carlo. De hecho, a partir del mes de octubre del 2003, el Observatorio Auger del Sur se convirtió en el arreglo de detectores más grande del mundo, duplicando la apertura del observatorio AGASA. El observatorio del sur terminará de construirse a finales del 2006, con un costo de aproximadamente 50 millones de dólares, de los cuales México habrá aportado cerca del 2.5 por ciento en componentes fabricados en la industria mexicana, principalmente a través de los tanques de polietileno que se usan como detectores Cherenkov en el arreglo de superficie. Por otro lado, el Observatorio Auger del Norte se construirá en el suroeste de Estados Unidos, en el estado de Utah o de Colorado, comenzando en 2005 y con miras a concluir en 2007. La participación mexicana en el Observatorio Auger del Norte consistirá en apoyo con estudiantes, técnicos y profesores durante la instalación de los detectores que se usarán, así como en las pruebas preliminares y en el análisis de los datos que se obtendrán. La participación financiera del grupo mexicano en el observatorio del norte se definirá una vez que se cumpla con los compromisos adquiridos con el observatorio del sur.

## POSIBLES FUENTES

En la década de los sesenta, Greisen e independientemente Kuzmin y Zatsepin (Greisen, 1965; Zatsepin y Kuzmin, 1966) se dieron cuenta de que los protones que viajan en el medio intergaláctico con energías superiores a  $5 \times 10^{19}$  electronvolts deberían perder su energía gradualmente al interactuar con los fotones de la radiación cósmica de fondo, de modo que un protón que llega a la Tierra con energía superior a  $5 \times 10^{19}$  electronvolts no puede provenir de una distancia mayor de alrededor de 100 megaparsecs, es decir, cerca de 300 millones de años luz (Aharonian y Cronin, 1994; Puget y colaboradores, 1976; Stecker y Salomon, 1999; Protheroe y Biermann, 1996). Por otro lado, hay razones para esperar que aun cuando los rayos cósmicos ultraenergéticos tengan carga eléctrica, sus desviaciones de una trayectoria recta producidas por los campos magnéticos inter y extra galácticos serían de alrededor de sólo un grado. Sin embargo, hasta la fecha no se ha encontrado ninguna correlación entre las direcciones de llegada de los rayos cósmicos ultraenergéticos y la ubicación de las galaxias más activas que se conocen dentro de una distancia de 100 megaparsecs de la Tierra. Entre las partículas conocidas, solamente los neutrinos pueden viajar distancias mucho mayores a 100 megaparsecs sin perder su energía.

Los rayos cósmicos ultraenergéticos pueden producirse genéricamente de dos modos diferentes: por aceleración o a través de la desintegración de partículas supermasivas X (con masas mucho mayores que  $10^{20}$  electronvolts/ $c^2$ ) cuya existencia no se ha demostrado. Los candidatos favoritos para producir la aceleración fuera de la galaxia son los núcleos activos de galaxias y las radiogalaxias. En ambos casos ocurren procesos sumamente violentos que posiblemente involucran hoyos negros supermasivos. Otra posibilidad es que los rayos cósmicos se deban a la aceleración de monopolos magnéticos libres, cuya existencia tampoco se ha confirmado, en los campos magnéticos galácticos o extragalácticos. En relación con el segundo mecanismo, las partículas X podrían producirse como reliquias de la creación del Universo, incluyendo los llamados defectos topológicos. Éstos pueden ser monopolos magnéticos, cuerdas cósmicas o paredes de dominio, que se podrían haber originado en una transición de fase durante la expansión y enfriamiento del Universo temprano (Hill y colaboradores, 1987). La escala de energía típica asociada a estos objetos es la escala de las *teorías de gran unificación*, que es del orden de  $10^{24}$  electronvolts, por lo que estos objetos podrían producir rayos cósmicos con energías superiores a  $10^{20}$  electronvolts.

Sin embargo, hasta ahora todas las posibilidades teóricas concebidas para producir rayos cósmicos ultraenergéticos tienen dificultades; por esta razón, para poder descartar teorías alternativas es crucial contar con un experimento como el Observatorio Pierre Auger, que sea capaz de proporcionar una muestra significativa de datos en el extremo superior del espectro de rayos cósmicos con buenas resoluciones para la energía y el ángulo de arribo, además de una alta sensibilidad a la composición y una exposición uniforme sobre todo el cielo.

## EL GRUPO MEXICANO

La participación del grupo mexicano en el proyecto Pierre Auger, desde 1996 a la fecha, pretende continuar con el desarrollo de la física de rayos cósmicos que iniciara en México don Manuel Sandoval Vallarta hace 70 años. En este grupo participan dos decenas de investigadores de cuatro instituciones: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y

La participación del grupo mexicano en el proyecto Pierre Auger, desde 1996 a la fecha, pretende continuar con el desarrollo de la física de rayos cósmicos que iniciara en México don Manuel Sandoval Vallarta hace 70 años

Centro de Investigación y Estudios Avanzados (Cinvestav), en el Distrito Federal, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), en Morelia. Hasta la fecha el grupo mexicano ha demostrado un gran nivel de integración interinstitucional, que le ha permitido contribuir en forma importante en la fase de diseño y de construcción del observatorio. En particular, el grupo ha influido en el diseño de la óptica del detector de fluorescencia, en los métodos de calibración y de monitoreo de los detectores Cherenkov y en la instalación de los componentes del observatorio del sur. Esta participación ha permitido al grupo mexicano contar con libre acceso a todos los datos del observatorio, y actualmente

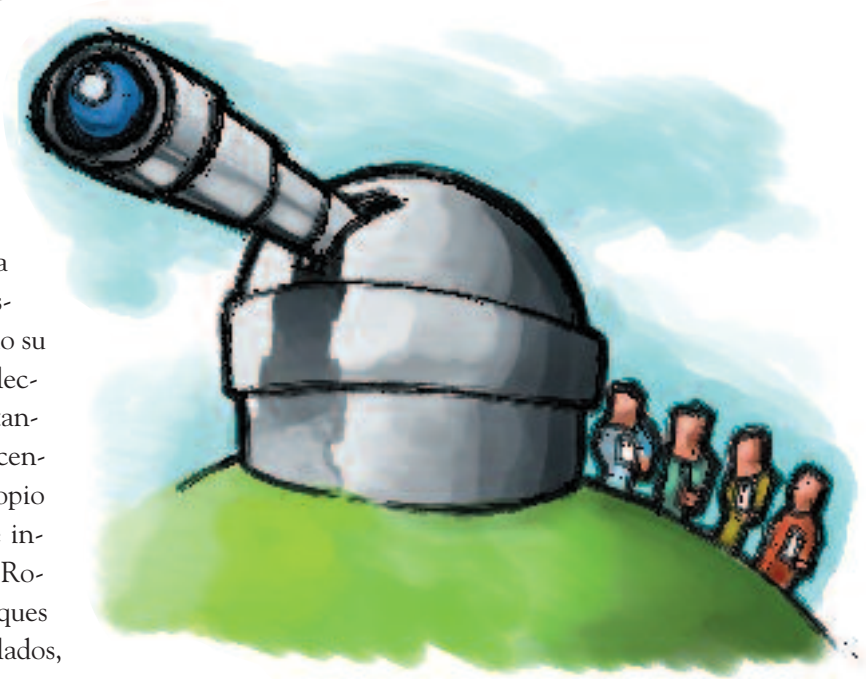
La primera Escuela de Instrumentación del Comité Internacional para Aceleradores Futuros, que se llevó a cabo en noviembre del 2002 en Morelia, contó con la participación de ponentes en pláticas, cursos y sesiones experimentales de primer nivel mundial, y de cerca de 80 estudiantes de México, Latinoamérica, Europa y Estados Unidos

contribuye al análisis de los mismos; desde 1997 ha habido participación de mexicanos en puestos de dirección dentro de la colaboración Auger. Entre los investigadores participantes en este grupo se cuenta con especialistas en detectores, en *software* y en aspectos teóricos de los rayos cósmicos. El trabajo del grupo se pone en evidencia en las numerosas publicaciones, participaciones en congresos y estudiantes tesistas graduados en licenciatura, maestría y doctorado asociados al proyecto ([www.fis.cinvestav.mx/~auger/](http://www.fis.cinvestav.mx/~auger/)).

Con el propósito de desarrollar la investigación, docencia y formación de recursos humanos en el área de rayos cósmicos, se han instalado laboratorios de investigación y docencia en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. En estos laboratorios, consistentes en arreglos de detectores semejantes a los del Observatorio Pierre Auger, pero de menores dimensiones, se detectan chubascos originados por rayos cósmicos de energías intermedias (alrededor de  $10^{15}$  electronvolts). La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla también cuenta con un prototipo de detector de fluorescencia y su electrónica asociada, ambos diseñados y construidos por su propio personal. En estos laboratorios también se estudian algunas propiedades de las partículas que se producen en las colisiones de los rayos cósmicos primarios con los núcleos atmosféricos; por ejemplo, se han hecho mediciones de las vidas medias de partículas inestables como el kaón, el pión y el muón. Con el propósito de impulsar la física experimental en esta área, el Comité Internacional para Aceleradores Futuros, compuesto por los directores de los principales laboratorios del mundo en física de partículas elementales, aprobó en febrero de 2001 la creación de un Centro de Instrumentación del Comité Internacional para Aceleradores Futuros en la Universidad Michoacana, que contribuirá a la formación de recursos humanos en el uso de detectores de radiación ionizante en México y la región de Centroamérica y el Caribe. La primera Escuela de Instrumentación del Comité Internacional para Aceleradores Futuros, que se llevó a cabo en noviembre del 2002 en Morelia, contó con la participación de ponentes en pláticas, cursos y sesiones experimentales de primer nivel mundial, y de cerca de 80 estudiantes de México, Latinoamérica, Europa y Estados Unidos.

El grupo mexicano participante en el Observatorio Pierre Auger contrajo el compromiso de aportar 550 tanques de polietileno para ser usados como detectores Cherenkov; con este fin se estableció contacto con la industria mexicana capaz de fabricar éstos y otros componentes para el observatorio. La idea de

utilizar polietileno de alta densidad para los detectores Cherenkov de agua se originó en el grupo de México y resultó ser superior en calidad y costo a la idea considerada originalmente de utilizar acero. El grupo mexicano realizó estudios detallados de la transparencia del agua y del crecimiento de bacterias en este tipo de contenedores, corroborando su pertinencia. La empresa mexicana seleccionada para la manufactura de estos tanques fue Rotoplás, que cuenta con un centro de investigación y desarrollo propio y que se asesora con instituciones de investigación nacionales. Hasta ahora, Rotoplás ha proveído cerca de 500 tanques Cherenkov del total de los 740 instalados, habiendo demostrado suficientemente su calidad, por lo que podría incluso proveer casi todos los 1 600 detectores Cherenkov requeridos en el observatorio del sur.



## CONCLUSIONES

La construcción del Observatorio Pierre Auger empezó en marzo de 1999 en el sitio del sur, en la provincia de Mendoza en Argentina, de modo que desde octubre del 2003 es el observatorio más grande del mundo, y ha detectado ya un número considerable de eventos con energías mayores a  $10^{19}$  electronvolts. La construcción del observatorio del norte empezará en 2007 y finalizará en el 2009. El objetivo principal del observatorio es, en primer lugar, detectar varias centenas de rayos cósmicos ultraenergéticos y, en segundo lugar, hacer un análisis detallado de éstos para resolver las tres interrogantes siguientes: i) ¿cuál es su frecuencia de llegada a la Tierra como función de sus energías?; ii) ¿cuál es su composición química?; y iii) ¿de dónde vienen? Para lograr este objetivo, el Observatorio Pierre Auger de Rayos Cósmicos constará de dos instalaciones, una en el hemisferio sur y otra en el hemisferio norte, con cuatro detectores de fluorescencia y un arreglo de detectores de superficie de 3 mil kilómetros cuadrados cada una. Se espera que cada sitio del observatorio Auger registre alrededor de 3 mil rayos cósmicos con energías mayores que  $10^{19}$  electronvolts por año; este número permitirá responder cada una de las tres interrogantes mencionadas en un periodo de dos años a partir del 2005. El

El objetivo principal del observatorio es, en primer lugar, detectar varias centenas de rayos cósmicos ultraenergéticos y, en segundo lugar, hacer un análisis detallado de éstos para resolver las tres interrogantes siguientes: i) ¿cuál es su frecuencia de llegada a la Tierra como función de sus energías?; ii) ¿cuál es su composición química?; y iii) ¿de dónde vienen?



tiempo de vida útil del Observatorio Auger será de unos 20 años. Durante este tiempo de operación se espera descubrir paulatinamente las fuentes de los rayos cósmicos ultraenergéticos; estos descubrimientos, que podrían indicar la existencia de fenómenos astrofísicos aún desconocidos, nos permitirán refinar nuestras respuestas a medida que se haga el análisis con un número cada vez mayor de eventos acumulados.

La participación del grupo mexicano en el Proyecto Pierre Auger inició en 1996 mediante un gran nivel de integración interinstitucional. El grupo mexicano ha hecho contribuciones importantes al diseño del observatorio, y a la fecha participa activamente en su construcción, toma de datos y en el análisis de los mismos. También se ha logrado la participación exitosa de la industria mexicana en este proyecto.

## RECONOCIMIENTOS

La participación del grupo mexicano en el Observatorio Pierre Auger ha sido posible gracias al apoyo del Conacyt, bajo los Proyectos de Grupo G32739E y G38706E; a proyectos aprobados por FOMES/SEP en la BUAP y en la UMSNH; y al apoyo institucional de la BUAP, UNAM, Cinvestav y UMSNH. Los autores hacemos un reconocimiento al Dr. Arnulfo Zepeda por su desempeño como líder del grupo mexicano en el Observatorio Pierre Auger de 1996 a la fecha.

## Bibliografía

- Aharonian, F. A. y J. W. Cronin (1994), *Phys. Rev. D* 50, pág.1892.
- Auger Collaboration (2003), "Properties and Performance of the Prototype Instrument for the Pierre Auger Observatory", enviado a *Nucl. Instr. and Meth. A*.
- Clay, R. y B. Dawson (1997), *Cosmic Bullets: High Energy Particles in Astrophysics*, Reading Mass., Addison-Wesley.
- Bluemer, H. (2003), conferencia en el 28<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, julio 31-agosto 7, Tsukuba, Japón (<http://ik1au1.fzk.de/~bluemer/auger-highlight.pdf>).
- Cronin, J. W. (2001), en *International Workshop On Observing Ultra High Energy Cosmic Rays From Space and Earth*, Salazar, H., L. Villaseñor y A. Zepeda (editores), Metepec, Puebla (México) agosto 9-12, publicado en *AIP Conf. Proceedings*, vol. 566, Melville, Nueva York, American Institute of Physics, pág. 1.
- Greisen, K. (1965), *Phys. Rev. Lett.* 16, 748.
- Hill, C. T, D. N. Schramm y T. P. Walker (1987), *Phys. Rev. D* 36, 1007.
- Protheroe, R. J. y P. L. Biermann (1996), *Astropart. Phys.* 6, 45.
- Puget, J. L., F. W. Stecker y J. H. Bredekamp (1976), *Astrophys. J.* 205, 638.
- Stecker, F.W y Salomon (1999), *Astrophys. J.* 512, 521.
- Zatsepin, G. T. y Kuzmin, V. A (1966), *JETP Lett.* 4, 78.

---

**Humberto Salazar Ibagüen** es egresado de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Obtuvo su doctorado en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados (Cinvestav) del Instituto Politécnico Nacional, y su posdoctorado en la Universidad de Jena, Alemania. Es miembro y representante ante el *Collaboration Board* del Grupo Pierre Auger, y fue *task leader* del detector de superficie del Observatorio Auger de 1997 a 2001. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores y de la Academia Mexicana de Ciencias. Fue director y actualmente es profesor investigador de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la BUAP. Actualmente trabaja en el análisis de datos del Observatorio Auger.  
salazar@fcm.buap.mx

**Luis Manuel Villaseñor Cendejas** es egresado de la Escuela de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Hizo su doctorado en el Cinvestav con trabajo de tesis en el grupo UA1 del CERN, en Ginebra, Suiza, y su posdoctorado en el laboratorio del *Superconducting Super Collider* de Dallas, Texas. Es miembro y representante ante el *Collaboration Board* del Grupo Pierre Auger por parte de la UMSNH, fue *sub-task leader* de calibración del detector de superficie del Observatorio Auger de 1997 a 2001. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores y de la Academia Mexicana de Ciencias. Es presidente de la División de Partículas y Campos de la Sociedad Mexicana de Física. Fue miembro fundador, director y actualmente profesor investigador del Instituto de Física y Matemáticas de la UMSNH en Morelia. Actualmente trabaja en el análisis de datos del Observatorio Auger.  
villasen@ifm.umich.mx

