

## Astrofísica extrema: buscando las partículas más energéticas del Universo con el Observatorio Auger de Malargüe

*Ingomar Allekotte<sup>1</sup> - Esteban Roulet<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Instituto Balseiro. Univ. Nac. de Cuyo. Centro Atómico Bariloche. Argentina  
ingo@cab.cnea.gov.ar

<sup>2</sup> CONICET. Centro Atómico Bariloche. Argentina  
roulet@cab.cnea.gov.ar

*Los rayos cósmicos son partículas subatómicas muy energéticas provenientes del espacio exterior. Describimos sus características, con particular énfasis en los rayos cósmicos de las más altas energías y los interrogantes científicos asociados a ellos que aún no se han podido resolver. Explicamos cómo funciona el Observatorio Pierre Auger, el mayor detector de rayos cósmicos ultraenergéticos del mundo, que está siendo construido en Mendoza.*

**Palabras clave:** rayos cósmicos, astropartículas, lluvias atmosféricas, Observatorio Pierre Auger.

*Cosmic rays are energetic particles from outer space. We describe their characteristics, with particular emphasis on the highest energy cosmic rays and the still unresolved scientific challenges they pose. We also describe the Pierre Auger Observatory, which is the largest ultra-high energy cosmic ray detector in the world and is being built in Mendoza.*

**Keywords:** cosmic rays, Pierre Auger Observatory.

### Introducción

La pequeña ciudad de Malargüe alberga lo que hoy en día ya es el detector de rayos cósmicos más grande del mundo. Una vez finalizada su construcción, en el año 2006, este Observatorio tendrá un área efectiva de unos 3000 km<sup>2</sup>, instrumentada con detectores sensibles a las partículas con las mayores energías jamás observadas.

¿Cuáles son los motivos por los que más de 250 científicos provenientes de 15 países unieron esfuerzos para realizar esta empresa? La razón principal es sin duda el interés por extender la frontera del conocimiento científico, tanto en la física de partículas como en la astrofísica. Se espera de esta manera poder encontrar respuestas a los varios enigmas que surgieron a partir de las observaciones de rayos cósmicos efectuadas hasta el presente.

### ¿Qué son los rayos cósmicos?

El objeto de estudio del Observatorio Auger<sup>1</sup> son las partículas más energéticas que llegan hasta la Tierra provenientes del espacio exterior. De hecho, la atmósfera está siendo permanentemente bombardeada por partículas de alta energía, que en su mayoría son núcleos de distintos elementos (es decir, átomos que perdieron todos sus electrones). Entre éstos se incluyen los núcleos de hidrógeno, helio, carbono, nitrógeno, oxígeno y hierro, pero están también presentes otros elementos de la tabla periódica aunque en proporciones reducidas. Si bien esta radiación cósmica fue descubierta hace ya más de 90 años (por Víctor Hess en 1912) y fue estudiada intensamente en los últimos 50 años, existen una gran cantidad de cuestiones que aún no han sido comprendidas y que representan un real desafío para la ciencia moderna.

La observación de los rayos cósmicos se realiza con distintos tipos de experimentos, utilizando por ejemplo instrumentos colocados en globos aerostáticos o en satélites para detectar directamente a los rayos cósmicos antes de que interactúen en la atmósfera (es decir, detectando a las partículas primarias), o colocando un gran número de detectores en la superficie terrestre para observar las partículas secundarias que resultan de la interacción del rayo cósmico primario en la atmósfera. Como consecuencia de estas colisiones, la energía del rayo cósmico primario se va transfiriendo a un gran número de otras partículas, que constituyen las así llamadas cascadas o lluvias atmosféricas. Estas cascadas se inician a varios kilómetros de altura, en la alta atmósfera. Claramente el número de partículas secundarias es tanto mayor cuanto mayor sea la energía original y, por otra parte, cuanto mayor sea la energía también será mayor la profundidad a la que estas cascadas lleguen a su máximo desarrollo en la atmósfera. Esto permite que a partir de una energía  $E$  de aproximadamente unos  $10^{14}$  eV<sup>2</sup> se torne posible la observación de estos eventos, primero desde alturas elevadas (por ejemplo existen detectores en Chacaltaya cerca de La Paz en Bolivia, o en el Himalaya en Tibet), mientras que a energías muy altas, por encima de  $10^{18}$  eV, ya pueden observarse lluvias en su máximo desarrollo incluso a alturas próximas al nivel del mar. Fue precisamente el físico francés Pierre Auger quien en 1938 detectó por primera vez estas cascadas utilizando coincidencias entre detectores distantes. Otra técnica que se utiliza para detectar a los rayos cósmicos se basa en la observación de la luz fluorescente, básicamente ultravioleta, emitida por las moléculas del aire al ser excitadas por el paso de las partículas secundarias de la lluvia atmosférica. Esto claramente sólo es posible durante las noches sin nubes y sin Luna.

El gran problema que presenta la detección de los rayos cósmicos muy energéticos es que cuanto mayor es su energía, tanto menor es la frecuencia con la que arriban. Se observa que el flujo de rayos cósmicos es máximo para energías cercanas a  $10^9$  eV, y que a energías mayores decrece siguiendo aproximadamente

una ley de potencias, es decir:

$$N(E > E_0) \propto E^{-\alpha}$$

donde el parámetro  $\alpha$ , llamado índice espectral, tiene un valor cercano a dos<sup>3</sup>. Esto significa que si se mide el flujo  $N(E > E_0)$  (que es la cantidad de rayos cósmicos que atraviesan una dada superficie por unidad de tiempo y con energía mayor que cierto valor  $E_0$ ), éste se encontrará reducido aproximadamente en un factor cien (más precisamente  $10^\alpha$ ) cada vez que se aumente el valor considerado de  $E_0$  por un factor diez. Por lo tanto, si bien el flujo de rayos cósmicos es muy grande a bajas energías (del orden de un rayo cósmico atravesando cada  $\text{cm}^2$  en un segundo para energías de alrededor de  $10^{10}$  eV), al aumentar la energía el flujo se reduce considerablemente y por ejemplo por encima de  $10^{19}$  eV resulta casi 18 órdenes de magnitud menor. Teniendo en cuenta que en un  $\text{km}^2$  hay  $10^{10}$   $\text{cm}^2$  y que un año tiene aproximadamente  $3.10^7$  s, esto significa que en una superficie de 1  $\text{km}^2$  llegará, en promedio, menos de un rayo cósmico por año con  $E > 10^{19}$  eV. Esto muestra claramente por qué son necesarias superficies de varios miles de  $\text{km}^2$  (como la que cubrirá el Observatorio Auger, Figura 1) para detectar un número razonable de eventos de muy alta energía en algunos años. Por ejemplo, el experimento Agasa que funcionó durante la última década en Japón cubriendo una superficie de 100  $\text{km}^2$ , registró unos mil eventos por encima de  $10^{19}$  eV y tan solo una docena por encima de  $10^{20}$  eV. Son precisamente estos eventos tan infrecuentes los que actualmente atraen el mayor interés en la comunidad de científicos de rayos cósmicos.

### ¿El final del espectro?

Una de las incógnitas cruciales que estas investigaciones buscan responder es hasta qué energías se extiende el espectro de rayos cósmicos, y si eventualmente éste se acaba más allá de cierta energía máxima. El rayo cósmico más energético observado hasta el presente tenía una energía de  $3.10^{20}$  eV, que es realmente enorme. Por ejemplo, podemos compararla con las energías producidas en los mayores aceleradores de partículas fabricados por



*Figura 1: Observatorio Auger: los 1600 puntos indican detectores de superficie, separados 1,5 km entre sí. Los 4 edificios de telescopios de fluorescencia se encuentran en 4 elevaciones, denominadas Los Leones, Coihueco, Morados y Loma Amarilla. Las líneas en los edificios de fluorescencia indican los ángulos de visión de cada uno de los 6 telescopios.*

el hombre, que en la actualidad alcanzan unos  $10^{12}$  eV, y llegarán a  $7 \cdot 10^{12}$  eV con el futuro colisionador LHC (Large Hadron Collider) en construcción en Europa. Es por lo tanto difícil imaginar que algún día, incluso en un futuro lejano, pueda lograrse artificialmente producir partículas elementales con energías comparables a las alcanzadas por los rayos cósmicos. Como decía el famoso cosmólogo soviético Boris Zeldovich, “el Universo es el acelerador de los pobres”, ya que nos ofrece generosamente rayos cósmicos de muy alta energía, y el único problema es lograr detectarlos para poder así analizar en detalle a estas partículas.

### Las fuentes de rayos cósmicos

Otro de los problemas fundamentales es lograr entender dónde y cómo se producen estos rayos cósmicos, y es aquí donde se realiza la conexión con la astrofísica. El espectro de ley de potencias observado muestra que su origen no es térmico. Fue Enrico Fermi quien sugirió en 1949 que podía resultar de procesos estocásticos en los que los rayos cósmicos son acelerados tras un gran número de sucesivas interacciones con estructuras magnéticas en movi-

miento, en las que a veces ganan y otras pierden energía. De hecho se comprendió luego que este tipo de procesos puede producirse eficientemente en las ondas de choque que resultan por ejemplo cuando una estrella muy masiva explota dando lugar a una supernova, que expulsa materia a grandes velocidades hacia el medio interestelar. Es por lo tanto muy plausible que buena parte de los rayos cósmicos hayan sido acelerados por las supernovas ocurridas en el pasado en nuestra galaxia. Sin embargo, es difícil concebir que estos procesos puedan acelerar partículas a más de  $10^{18}$  eV, y por lo tanto se cree que a energías mayores los rayos cósmicos se originan fuera de nuestra galaxia, en objetos sumamente energéticos y violentos. Por ejemplo, podrían producirse en chorros de materia con velocidades relativistas (jets) emitidos por galaxias que están siendo devoradas por agujeros negros supermasivos ubicados en sus centros (núcleos activos galácticos), o en las explosiones asociadas a los destellos de rayos gamma que llegan a la Tierra un par de veces por día provenientes de galaxias muy lejanas.

Para aclarar esta cuestión sería fundamental poder determinar la ubicación de las fuentes de rayos cósmicos, y así conocer la natura-

leza de los sitios en los que se originaron. La mayor dificultad para esto reside en que, al ser los rayos cósmicos partículas con carga eléctrica y al estar el Universo permeado por campos magnéticos en distintas escalas, tanto dentro de las galaxias como en el espacio intergaláctico, las trayectorias de los rayos cósmicos son desviadas y por lo tanto cuando éstos llegan a nosotros sus trayectorias ya no apuntan más en la dirección de sus fuentes. En particular, a energías por debajo de  $10^{18}$  eV las desviaciones son tan grandes que los rayos cósmicos efectivamente se difunden en el medio interestelar y llegan a la Tierra esencialmente desde todas las direcciones. Es sólo a energías mayores que las trayectorias se vuelven progresivamente más rectilíneas. A energías superiores a aproximadamente  $10^{19}$  eV ya se torna factible hacer *astronomía de posición con rayos cósmicos*, es decir que estudiando las direcciones de arribo de estas partículas es posible estudiar la distribución de sus fuentes. Cuando se logre observar un gran número de rayos cósmicos por encima de  $10^{19}$  eV, comenzarán a obtenerse concentraciones de eventos en distintas direcciones del cielo, permitiendo la identificación de las fuentes en las que éstos se originaron y de esta manera comenzará a develarse parte del misterio.

Otro ingrediente útil para comprender la naturaleza de las fuentes de rayos cósmicos es la determinación de la composición de éstos, es decir, saber si son núcleos livianos o pesados, o incluso si constan de fotones (los cuantos de la radiación electromagnética) o de partículas más exóticas como los neutrinos. De hecho, la composición de los rayos cósmicos observada cambia con la energía, siendo mayoritariamente liviana (H y He) por debajo de  $10^{15}$  eV, tornándose más pesada (C, O, Fe) a energías de  $10^{16}$  -  $10^{17}$  eV y existiendo indicios, si bien algo inciertos, de que por encima de  $10^{18}$  eV hay nuevamente una tendencia hacia los núcleos livianos. Esta información puede ser útil porque si bien más del 90% de los átomos del Universo son de H, en las estrellas muy masivas éste se convierte por sucesivas fusiones nucleares en elementos pesados. Al explotar una supernova, la parte central de estas estrellas es mayoritariamente de hierro, de modo que observar un exceso de elementos

pesados sugeriría que las fuentes de rayos cósmicos pueden estar asociadas a este tipo de estrellas. Por otra parte, la máxima energía a la que puede ser acelerado un núcleo resulta ser proporcional a su carga eléctrica, lo que sugeriría que podría ser más fácil alcanzar las más altas energías para los núcleos pesados que para los livianos. Sin embargo, también hay que notar que en los procesos violentos en los que se aceleran los rayos cósmicos, o incluso durante su propagación desde las fuentes hasta llegar a nosotros, es posible que los núcleos se partan en fragmentos más livianos debido a su interacción con otros núcleos o con la radiación presente.

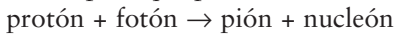
### La supresión de GZK

En 1965, Penzias y Wilson detectaron una radiación electromagnética de microondas proveniente de todas las direcciones del cielo, que fue quizás la observación más revolucionaria de la cosmología moderna, junto con la realizada por Hubble de la expansión del Universo. Esta radiación tiene un espectro térmico correspondiente a una temperatura de 2,7 K (es decir, una distribución como la de un cuerpo negro a unos  $-270^{\circ}\text{C}$ ), que se originó cuando el Universo era muchísimo más joven (tenía tan solo 100000 años de edad) y estaba mucho más caliente (a unos 3000 K). Fue en ese momento cuando electrones y núcleos atómicos, que hasta entonces formaban un plasma ionizado que interactuaba fuertemente con la radiación electromagnética, se combinaron para formar átomos neutros. Cuando sucedió esto, los fotones que estaban en el baño térmico se encontraron súbitamente desacoplados del resto de la materia, pudiendo entonces viajar libremente hasta el día de hoy, en el que los observamos más fríos (es decir, con mayores longitudes de onda) por el efecto de la expansión del Universo.

Inmediatamente después de este descubrimiento, Greisen en EEUU y Zatsepin y Kuzmin en URSS se dieron cuenta de que la presencia de esta radiación en todo el Universo afectaría a la propagación de los rayos cósmicos, produciendo una supresión de aquellos de muy alta energía (efecto de GZK, por las ini-

ciales de sus descubridores). En efecto, si consideramos a un protón (núcleo de H) de energía superior a  $10^{20}$  eV chocando frontalmente con un fotón de la radiación cósmica (cuya energía media es  $\epsilon \approx 10^{-3}$  eV), y si en vez de mirar a esta colisión en el sistema del laboratorio recién descrito miramos al proceso desde el sistema de referencia en el que el protón está en reposo, es fácil ver que la energía del fotón en este sistema  $\epsilon'$  será muy grande. Esto surge de recordar la famosa relación de Einstein  $E = \gamma mc^2$ , donde  $m$  es la masa de la partícula,  $c \approx 300000$  km/s es la velocidad de la luz, y el factor relativista de una partícula que se mueve con velocidad  $v$  es:  $\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$

Como para un protón se tiene  $mc^2 = 10^9$  eV, el factor relativista resulta ser  $\gamma \approx 10^{11}$  ( $E/10^{20}$  eV), y por lo tanto la energía del fotón en el sistema de reposo de un protón de  $10^{20}$  eV, que se obtiene realizando una transformación de Lorentz, resulta ser  $\epsilon' = \gamma \epsilon \approx 10^8$  eV. La energía recién calculada es del orden del valor de la masa de las partículas llamadas piones, y por lo tanto es la necesaria para que pueda suceder la reacción



donde el nucleón será un protón si el pión es neutro, o un neutrón si el pión es de carga positiva. Éste es el proceso que más afecta a la propagación de protones de muy alta energía, ya que en cada colisión éstos pierden aproximadamente un 10% de su energía. Teniendo en cuenta que en la distribución térmica de fotones cósmicos habrá una fracción no despreciable que tengan una energía mayor que la promedio, resulta que la producción de piones es relevante para protones con energías por encima de  $5 \cdot 10^{19}$  eV. Por otra parte, el camino libre medio de los protones, es decir la distancia típica entre colisiones sucesivas, es de unos 10 Mpc, por lo que después de recorrer unos 50 Mpc la energía inicial se habrá degradado significativamente<sup>4</sup>. Por lo tanto, si los rayos cósmicos con energías por encima de  $5 \cdot 10^{19}$  eV son protones y sus fuentes están en galaxias lejanas, se espera que su flujo resulte sumamente suprimido por la interacción con el fondo de microondas.

Es de notar que si los rayos cósmicos fueran núcleos pesados en vez de protones, también sería de esperar una supresión de sus flu-

jos por encima de  $10^{20}$  eV si se originan muy lejos de nuestra galaxia, aunque en este caso la atenuación al chocar con los fotones cósmicos se debe mayoritariamente a la desintegración de los núcleos, y no a la producción de piones (al ser la masa de los núcleos mayor que la de los protones, sus factores relativistas  $\gamma$  son menores para una dada energía, y por lo tanto en el sistema de reposo del núcleo los fotones cósmicos pueden no tener energía suficiente para producir piones, aunque sí para fragmentar a los núcleos).

Por otro lado, si los rayos cósmicos de las más altas energías provinieran de fuentes cercanas, a distancias inferiores a los 50 Mpc, entonces éstas deberían ser fácilmente identificables. Sin embargo, no es posible correlacionar los rayos cósmicos más energéticos detectados hasta el presente con ninguna fuente cercana suficientemente activa.

Quizás el mayor enigma a resolver para el Observatorio Auger sea aclarar la discrepancia que existe en la actualidad entre los dos mayores experimentos que han medido el espectro de rayos cósmicos por encima de  $5 \cdot 10^{19}$  eV, y determinar si existe o no la supresión de GZK. Efectivamente, el experimento Agasa antes mencionado, que mide las lluvias atmosféricas cuando éstas llegan a la superficie, dice no observar ninguna supresión en el espectro, mientras que el experimento HiRes, que observa la fluorescencia producida en la atmósfera, afirma haber observado esta supresión.

## El concepto del Observatorio Auger

El Proyecto Auger combina las dos técnicas arriba mencionadas en un solo observatorio, en un diseño denominado *híbrido*: un arreglo de detectores de superficie (que describiremos en detalle más adelante) registra las lluvias de partículas cuando éstas llegan a la superficie terrestre, y un sistema de telescopios especiales registra la luz de fluorescencia que producen estas lluvias mientras atraviesan la atmósfera, Figura 2. Al combinar dos técnicas experimentales distintas y complementarias, el concepto híbrido de Auger permite reducir considerablemente los errores sistemáticos de

medición y aprovechar las fortalezas de cada uno de los métodos de detección. Si bien los telescopios de fluorescencia sólo pueden funcionar en noches despejadas sin luz lunar directa, los datos que obtienen se utilizan para calibrar las observaciones del detector de superficie, que puede operar las 24 horas del día.

Una vez finalizada la construcción del Observatorio, en 2006, el detector de superficie constará de 1600 *detectores Cerenkov en agua*, instalados en un arreglo triangular con una separación de 1500 metros entre detectores vecinos. Cada detector es esencialmente un tanque herméticamente cerrado conteniendo 12000 litros de agua de máxima pureza, Figura 3. Cuando las partículas cargadas de la lluvia atraviesan el tanque y el agua, al ser partículas muy energéticas que poseen una velocidad mayor que la velocidad de la luz en el agua (que es  $c/n$ , donde  $n=1,33$  es el índice de refracción del agua), producen radiación Cerenkov, que es la radiación azulada que puede verse en las piletas de los reactores nucleares. Esta tenue radiación es reflejada por las paredes internas del tanque, que están recubiertas por un material altamente reflectante y difusivo, y es observada por 3 tubos fotomultiplicadores. Éstos son detectores de luz extremadamente sensibles, que pueden identificar incluso fotones individuales (es decir, los *cuantos* de luz, de energía  $E = h \nu$ , donde  $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  es la frecuencia del fotón).

La radiación Cerenkov recogida por los fototubos es convertida a una señal eléctrica, que es digitalizada y procesada por un sistema electrónico en cada detector. Si la señal supera un cierto valor umbral, entonces es almacenada en memoria y retransmitida a la estación central por un sistema de radio. Si varios detectores de superficie contiguos registran señales por encima del umbral casi simultáneamente, entonces lo más probable es que estas señales tengan un origen común: una lluvia de partículas producida por algún rayo cósmico de alta energía (hay que notar que una lluvia atmosférica de alta energía cubre un área de varios  $\text{km}^2$  cuando llega a la superficie terrestre). Entonces, el sistema registra las señales de todos estos tanques e identifica al *evento* como producido por un rayo cósmico. Los detectores también guardan la información temporal de los eventos, ya que poseen una placa de GPS (sistema de posicionamiento global basado en la información provista por una constelación de satélites) con la que es posible registrar los tiempos con una precisión mejor que los 25 nanosegundos<sup>5</sup>, y es así como se almacena la información de la señal digitalizada. Los detectores también poseen un sistema de paneles solares y baterías para su alimentación eléctrica, de modo que puedan funcionar en forma autónoma y con un mínimo de mantenimiento durante los 25 años en los que está prevista su operación.

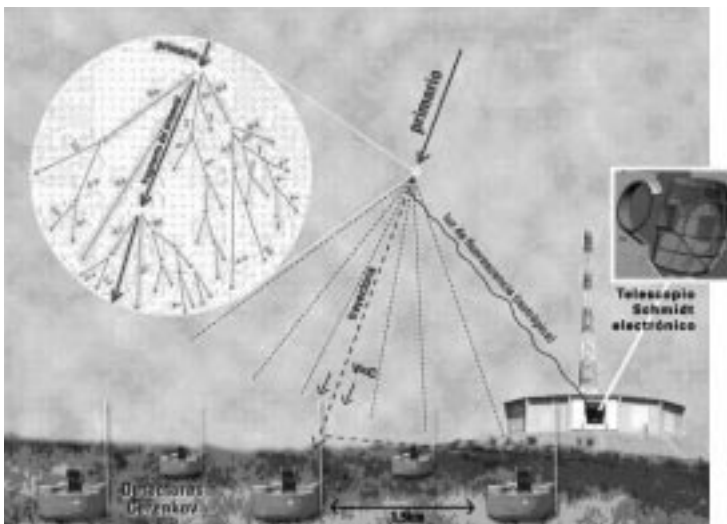


Figura 2: Esquema de una lluvia atmosférica y el detector híbrido.

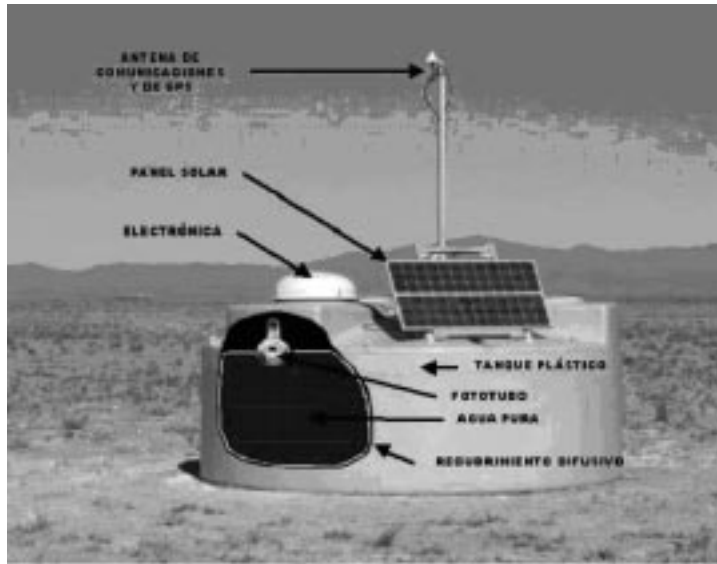


Figura 3: Detector de superficie del Observatorio Auger y sus componentes.

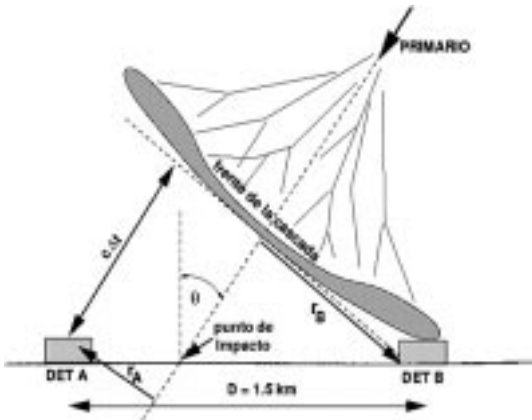
### La reconstrucción de eventos con el detector de superficie

¿Cómo se *reconstruye* la información sobre el rayo cósmico primario a partir de las señales registradas en los detectores de superficie? El primer paso consiste en calcular la dirección de arribo. Para ello es necesario saber que en una lluvia atmosférica todas las partículas se desplazan a una velocidad cercana a la de la luz, en forma casi paralela a la dirección de incidencia de la partícula cósmica original, Figura 4. Entonces, las partículas de la lluvia definen lo que se conoce como *frente de la lluvia*, una superficie que en una primera aproximación puede suponerse plana y perpendicular a la dirección de incidencia. A partir de los tiempos de arribo del frente de la lluvia a los distintos detectores puede inferirse el ángulo de arribo de la lluvia. Por ejemplo, en un análogo bidimensional como el que se muestra en la Figura 4, la diferencia en los tiempos de arribo del frente de la lluvia a los detectores A y B está dada por  $\Delta T = D \sin(\theta)/c$ , donde D es la distancia entre los detectores y  $\theta$  es el ángulo cenital de la lluvia. Dejamos como ejercicio para el lector desarrollar la ecuación para los ángulos cenital y azimutal de una lluvia en 3 dimensiones, a partir de los tiempos relativos de llegada del frente a 3 detectores no alineados.

En el caso de que haya más de 3 detectores con señal por encima del valor umbral, puede emplearse un proceso de minimización para hallar el plano del frente que mejor ajusta a los tiempos de arribo. Con 4 o más detectores activados también es posible efectuar una corrección por la curvatura del frente de la lluvia. Esta información ya es suficiente para hacer estudios de cómo se distribuyen las direcciones de arribo de los rayos cósmicos, lo que permite buscar posibles fuentes y estudiar anisotropías a pequeñas escalas (*clustering*) y a grandes escalas (es decir, si hay un déficit o un exceso de rayos cósmicos provenientes de ciertas direcciones, como por ejemplo el centro de la galaxia, el plano supergaláctico, etc.).

El paso siguiente consiste en determinar el punto de impacto de la lluvia (es decir, el punto sobre la superficie terrestre sobre el que hubiera impactado el rayo cósmico primario si no hubiera sufrido interacciones con la atmósfera). Un valor aproximado del punto de impacto puede obtenerse calculando el *baricentro* de los tres tanques con mayor señal, promediando sobre sus posiciones con un peso proporcional a la raíz cuadrada de la señal en cada uno de ellos. La intensidad de la señal en función de la distancia al punto de impacto sigue una ley aproximada de potencias

$$S(r) = S_0 (r/r_0)^{-\beta}$$



donde  $r_0=1000$  m,  $S_0$  es la señal en  $r_0$ ,  $r$  es la distancia al eje de la lluvia y  $\beta$  es un coeficiente que depende del ángulo cenital de la lluvia. Por lo tanto, con un proceso de optimización es posible encontrar los valores para el punto de impacto y  $S_0$  que mejor ajustan a las señales observadas. Con el detector de superficie no es posible inferir en forma directa la energía del rayo cósmico primario. Para ello es necesario recurrir a simulaciones numéricas: empleando distintos códigos de computación se simula el rayo cósmico primario, su interacción con los átomos de la alta atmósfera y la propagación de las partículas secundarias que resultan. Dado que una lluvia atmosférica producida por un rayo cósmico de  $10^{19}$  eV contiene aproximadamente  $10^{11}$  partículas secundarias, es prácticamente imposible simular el desarrollo de la lluvia completa, por lo que se recurre a un proceso conocido como *thinning*, en el que se promedia sobre algunas partículas durante la simulación. Luego, es necesario simular la respuesta de los detectores, la producción de fotones Cerenkov y su detección en los fototubos. Esto permite encontrar una relación entre  $S_0$  y la energía del rayo cósmico primario.

La composición química de los rayos cósmicos primarios (es decir, discriminar si se trata de núcleos pesados o protones) es mucho más difícil de inferir a partir de las características de la lluvia atmosférica, y sólo puede hacerse en forma estadística. Los núcleos atómicos más pesados pueden aproximarse por un manojito de  $N$  protones y neutrones casi sueltos (ya que las energías de ligadura nuclear son mucho menores que las energías involucradas

en las colisiones), que por consiguiente llevan cada uno una fracción  $1/N$  de la energía total. Así las lluvias producidas por núcleos pesados se desarrollan antes. Al involucrar partículas más lentas, hay una mayor producción de muones (que son partículas similares a los electrones, pero unas 200 veces más pesados), que al tener mayor penetración en la atmósfera hacen que la señal en los detectores sea más breve. Así, el estudio de la relación entre la duración y la intensidad de las señales en los fototubos brinda información sobre la composición del rayo primario.

### Los telescopios de fluorescencia

En 4 edificios ubicados en la periferia del arreglo de detectores de superficie se emplazan los telescopios de fluorescencia, Figuras 1 y 2. Cada telescopio puede observar la atmósfera por encima de los detectores de superficie, abarcando una región de  $30^\circ \times 30^\circ$  (en elevación y acimut), por lo que se colocan 6 telescopios en cada edificio que observan  $30^\circ$  en elevación y  $180^\circ$  horizontalmente. Para captar únicamente la luz de fluorescencia ultravioleta que se produce en una lluvia atmosférica, los telescopios poseen en el diafragma de apertura un filtro que sólo permite el paso de luz UV. Asimismo, una lente anular corrige las aberraciones y permite aumentar la apertura. Cada telescopio en sí consiste en un espejo esférico de 3,4 metros de radio de curvatura y un tamaño de unos  $3,5$  m  $\times$   $3,5$  m que concentra la luz recolectada sobre una cámara de  $22 \times 20$  pixeles formada por 440 fototubos colocados a 1,7 m del espejo. La electrónica asociada permite registrar las señales de estos fototubos e identificar *eventos* cuando se activa alguna configuración de pixeles vecinos (por ejemplo, 5 pixeles en fila).

La luminosidad de fluorescencia que produce una cascada que atraviesa la atmósfera es esencialmente como un punto luminoso que se propaga a la velocidad de la luz a lo largo del eje de la lluvia. Cuando un telescopio de fluorescencia registra uno de estos eventos, es posible calcular con gran precisión el plano que forma el eje de la lluvia con el telescopio, y a



partir de los tiempos de arribo de la señal puede conocerse el ángulo de incidencia. La energía se deriva a partir de la luminosidad total registrada por el telescopio. Asimismo, el sistema de fluorescencia permite determinar con razonable precisión la profundidad atmosférica a la que la lluvia alcanza el máximo desarrollo (por un lado, la lluvia va creciendo a medida que se van formando nuevas partículas en la cascada, por el otro, una vez que la energía promedio de las partículas de la lluvia cae por debajo de un cierto umbral, éstas comienzan a degradarse y dispersarse sin dar lugar a nuevas partículas). El desarrollo del máximo de la lluvia también está íntimamente relacionado con la composición química del rayo primario.

### Importancia de mirar el cielo del Sur

Se espera finalizar la construcción del Observatorio Auger en Malargüe durante el año 2006, si bien ya a partir del 2004 se están tomando datos con los detectores a medida que

van entrando en funcionamiento (unos 400 a mediados del 2004). Inmediatamente después se espera comenzar con la construcción de un observatorio gemelo en el Hemisferio Norte. De esta manera, teniendo en cuenta la rotación terrestre diaria, entre ambos observatorios se podrá observar toda la esfera celeste. Se ha comenzado con la construcción en el hemisferio Sur porque los observatorios existentes (como el de Agasa en Japón y el HiRes en USA que ya hemos mencionado) están emplazados en el hemisferio Norte y por consiguiente el cielo austral está mucho menos estudiado a las más altas energías. El hemisferio Sur posee además la particularidad de que desde aquí se observa directamente el centro de nuestra galaxia, situado en las cercanías de la constelación del Sagitario, que no es visible desde las latitudes boreales.

La importancia de los temas a ser estudiados hace que haya grandes expectativas por parte de la comunidad científica internacional, que espera con ansiedad los resultados de las mediciones que se obtendrán en Malargüe.

### Notas

<sup>1</sup> Información actualizada Proyecto Auger: [www.auger.org.ar](http://www.auger.org.ar)

<sup>2</sup> Un electronvoltio (eV) es la energía que adquiere un electrón si es acelerado en un potencial eléctrico de 1 Voltio,  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$ .

<sup>3</sup> Se observa que  $\alpha=1,7$  para energías menores que  $3 \cdot 10^{15} \text{ eV}$ ,  $\alpha=2$  para  $3 \cdot 10^{15} \text{ eV} < E < 5 \cdot 10^{18} \text{ eV}$  y  $\alpha=1,7$  para energías mayores.

<sup>4</sup> Un megaparsec (Mpc) equivale a un millón de parsecs ( $1 \text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m} = 3,262 \text{ años luz}$ ). La distancia típica entre estrellas en nuestra galaxia es de algunos parsecs, el centro galáctico se encuentra a unos 8500 pc, la galaxia espiral más cercana, Andrómeda, se encuentra a un poco menos que 1 Mpc mientras que el cúmulo de galaxias más cercano, Virgo, se encuentra a unos 20 Mpc. Por lo tanto, 50 Mpc son, a escalas cósmicas, nuestro vecindario.

<sup>5</sup> 1 nanosegundo =  $10^{-9}$  segundos

### Bibliografía

- Allekotte, I. y Harari, D. (2002). Un desafío cósmico para el Observatorio Auger. *Ciencia Hoy*, 12 (71).  
 Clay, R. y Dawson, B. (2000). *Balas Cósmicas*. Editorial Reverté.  
 Etchegoyen, A. y Filevich, A. (1996). Las Mayores Energías de la Naturaleza. *Ciencia Hoy*, 5 (35).  
 Romero, G. E. y Combi, J. A. (1998). Los rayos cósmicos galácticos. *Ciencia Hoy*, 8 (48).