

HACIA LA ASTRONOMÍA DE RAYOS CÓSMICOS

¿Cuál es el origen de los rayos cósmicos de las más altas energías que llegan a la Tierra? Los recientes resultados del Observatorio Pierre Auger, ubicado en Mendoza, dan pistas en este sentido.

Ingomar Allekotte, Diego Harari, Silvia Mollerach y Esteban Roulet

Basta con mirar el cielo una noche despejada para constatar que del espacio exterior nos llega información del cosmos en forma de luz, tanto de las estrellas que la producen como de otros cuerpos celestes que simplemente la reflejan, como los planetas y los cometas. Pero casi todo lo que podemos observar a simple vista es luz proveniente de nuestra Galaxia, la Vía Láctea. Las únicas excepciones son la Gran Nube y la Pequeña Nube de Magallanes, dos galaxias enanas muy cercanas (en términos astronómicos) a la Vía Láctea, y la vecina galaxia de Andrómeda. Esta última aparece, a simple vista, como un pequeño punto brillante, si bien está compuesta por cientos de miles de millones de estrellas. Lamentablemente para nosotros, Andrómeda sólo es visible desde el Hemisferio

Norte. Sin embargo podemos consolarnos con el hecho de que es necesario encontrarse en el Hemisferio Sur para observar tanto las Nubes de Magallanes como así también la parte más brillante de nuestra Galaxia, el centro de la Vía Láctea, que se encuentra cerca de la constelación de Sagitario.

Además de la luz visible que recibimos del cosmos, también llega a la Tierra radiación electromagnética de otras longitudes de onda. Ya en 1938 Karl Jansky detectó señales de radio provenientes del centro de nuestra Galaxia. Se trata de radiación de mucha mayor longitud de onda y, por ende, de menor frecuencia que la visible. Así se dio inicio a la radioastronomía, es decir, el estudio del cosmos a partir de la observación de las ondas de radio. El cosmos emite radiación electromagnética en casi todas las longitudes de onda: los objetos celestes también producen radiación de microondas, infrarroja, ultravioleta, rayos X y los aún más energéticos rayos gamma, la radiación característica de las reacciones nucleares (Figura 1). Como nuestra atmósfera es opaca a todas estas radiaciones, su observación no pudo iniciarse hasta el advenimiento de satélites artificiales y otros equipos de vuelo en altura, hace tan sólo algunas décadas.

Pero los objetos celestes no sólo emiten luz en sus diversas longitudes de onda. En muchos de los procesos físicos en los que se produce luz, también se emiten partículas subatómicas que son lanzadas con gran energía al espacio, y algunas de éstas llegan hasta la Tierra. En el año 1912 Viktor Hess demostró la existencia de radiación muy energética proveniente del espacio. Tras un debate de muchos años, en los que se intentó establecer la naturaleza de esta radiación, se concluyó que se trata, en su mayor parte, de partículas subatómicas con carga eléctrica positiva. Estas partículas son núcleos de distintos átomos,

Palabras clave: Observatorio Pierre Auger, rayos cósmicos, astropartículas.

Ingomar Allekotte (1, 2). Dr. en Física. Instituto Balseiro, Argentina.
ingo@cab.cnea.gov.ar

Diego Harari (1, 2, 3). Dr. en Física. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
harari@cab.cnea.gov.ar

Silvia Mollerach (1, 2, 3). Dr. en Astrofísica. Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati, Italia.
mollerach@cab.cnea.gov.ar

Esteban Roulet (1, 3). Dr. en Física. Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati, Italia.
roulet@cab.cnea.gov.ar

(1) Centro Atómico Bariloche
(2) Instituto Balseiro, Comisión Nacional de Energía Atómica, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina.
(3) CONICET, Argentina.

Recibido: 16/06/08. Aceptado: 23/07/08

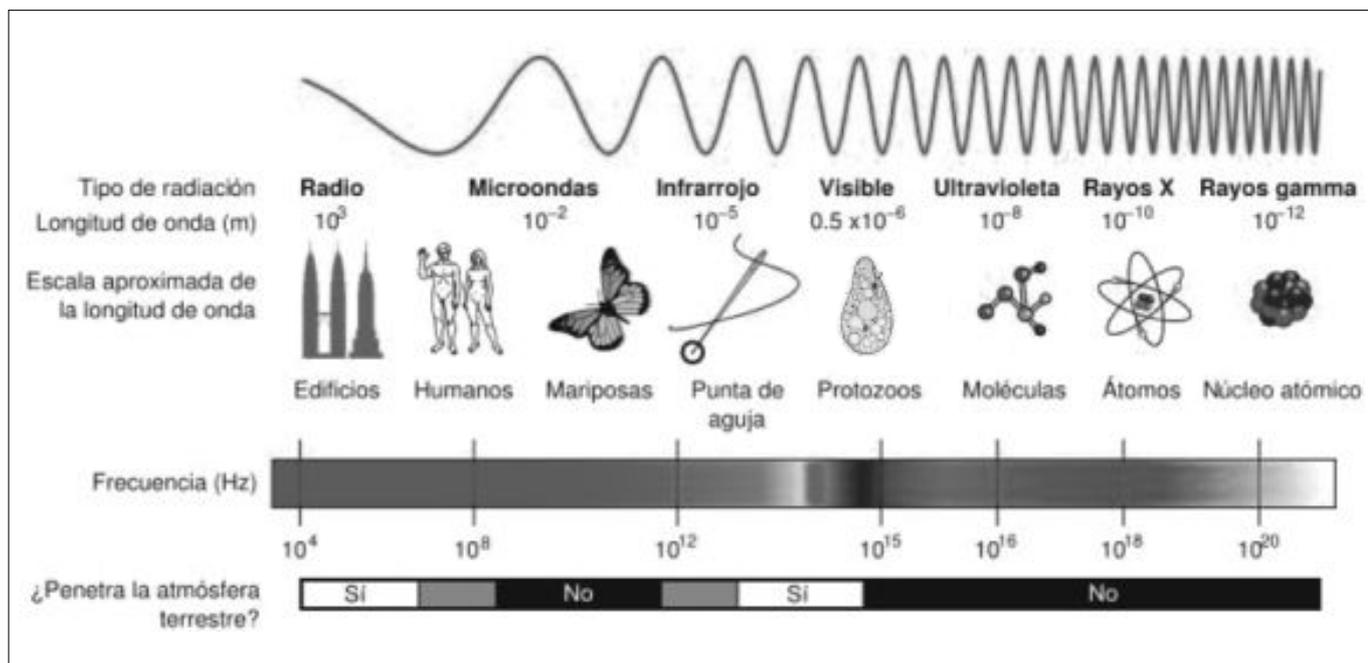


Fig. 1. El gráfico (adaptado de Wikipedia) representa, en una escala logarítmica, las distintas longitudes de onda de la radiación electromagnética con su correspondiente denominación y las frecuencias asociadas. En el mismo gráfico también se muestran diversos objetos de dimensiones similares a las longitudes de onda representadas más arriba. La barra inferior indica la transparencia atmosférica a la correspondiente longitud de onda.

desde núcleos de hidrógeno (es decir, protones) hasta núcleos de elementos pesados, como el hierro. A pesar de tratarse de partículas y no de radiación electromagnética, conservaron su equívoco nombre de *rayos cósmicos* por razones históricas.

Un poco de historia

En sus albores, el estudio de los rayos cósmicos estaba principalmente orientado a comprender el origen y las características de la radiación natural. A partir de la década de 1930, con el advenimiento de los primeros detectores de partículas (emulsiones fotográficas y cámaras de niebla) se observó que los rayos cósmicos de alta energía producen, en su colisión con la materia, nuevas partículas elementales, desconocidas hasta ese momento. Fue así como se descubrieron el positrón (la *antipartícula* del electrón, que posee sus mismas características pero carga eléctrica opuesta) y otras partículas más exóticas como los piones (también llamados *mesones Pi*) y muones. El empleo de rayos cósmicos como fuente de nuevas partículas elementales decayó con el advenimiento de los grandes aceleradores, con

los cuales se podía producir nuevas partículas en forma controlada.

Con el paso del tiempo y debido a la construcción de detectores cada vez más complejos y extensos se han observado rayos cósmicos con energías más altas. La Tierra está siendo bombardeada constantemente por una enorme cantidad de rayos cósmicos, del orden de 10.000 por metro cuadrado por segundo, pero éstos son mayoritariamente de las más bajas energías. A medida que aumenta la energía de los rayos cósmicos, éstos se vuelven más escasos. Hoy sabemos que existen rayos cósmicos de energías extremadamente altas, unos 100 millones de veces superiores a la máxima energía que puede imprimirse a un protón en el más potente acelerador de partículas creado por el ser humano. Sin embargo, estos rayos cósmicos son una rareza absoluta, pues sólo llegan a la Tierra a razón de uno por kilómetro cuadrado por siglo.

Debido a la escasez de los rayos cósmicos ultraenergéticos, para estudiarlos y poder comprender su origen se necesitan observatorios que cubran grandes extensiones. Su detección es posible por la formación de las así llamadas lluvias atmosféricas extendidas. Se trata de un fenómeno que se produce cuando un rayo cósmico ultraenergético penetra en la atmósfera terrestre, choca contra las moléculas del aire y como resultado de esa colisión se producen nuevas partículas, las que a su vez vuelven a colisionar con otras moléculas de aire, produciéndose una cascada con más y más partículas. En definitiva,

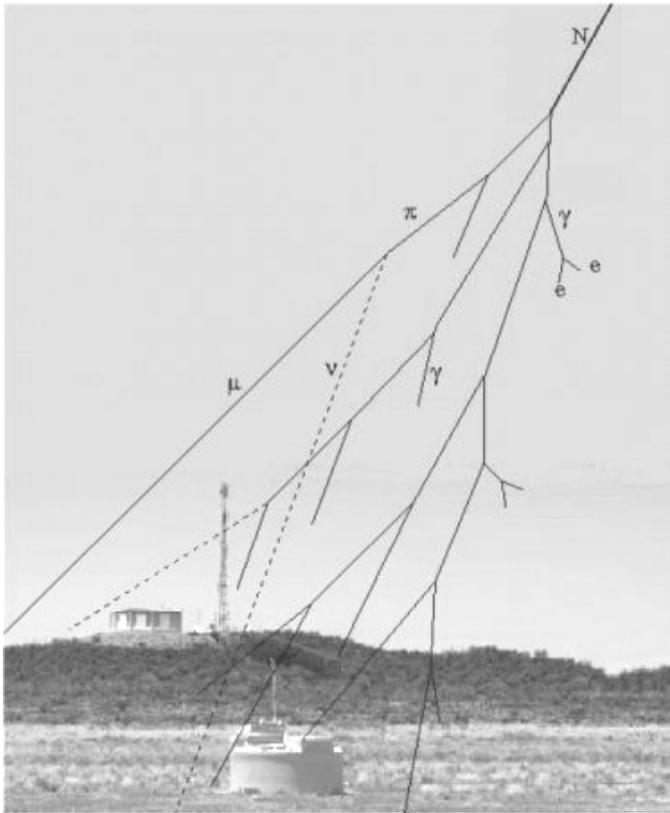


Fig. 2. Esquema de una lluvia atmosférica extendida (obviamente, imperceptible a simple vista), producida por un rayo cósmico de alta energía, que impacta sobre uno de los 1600 detectores de superficie del Observatorio Pierre Auger. Al fondo, el edificio que alberga los telescopios de fluorescencia y la antena de comunicaciones.

a partir de un rayo cósmico ultraenergético que incide sobre la alta atmósfera, a nivel de la superficie terrestre se produce una avalancha de cientos de miles de millones de partículas nuevas (Figura 2). Estas partículas se crean porque una fracción de la energía del rayo cósmico primario se convierte en masa, a través de la conocida ecuación de Einstein $E=mc^2$.

El mayor experimento diseñado para estudiar los rayos cósmicos ultraenergéticos es el Observatorio Pierre Auger. Está emplazado en la Pampa Amarilla aledaña a la ciudad de Malargüe, en la Provincia de Mendoza, cubriendo una superficie de 3000 km² con 1600 detectores, separados 1500 metros entre sí. Su construcción ha comenzado en el año 2000 y demandó un enorme esfuerzo de más de 400 científicos y técnicos de 17 países. Su instalación estará finalizada durante el 2008, pero ha tomado datos en forma estable desde enero de 2004 y ha registrado casi un millón de rayos cósmicos, de los cuales sólo una ínfima fracción tiene las más altas energías.

¿De dónde provienen?

El origen de estos rayos cósmicos ultraenergéticos es un misterio. Desde hace décadas se ha conjeturado que posiblemente provienen de fuentes que se encuentran fuera de

nuestra Vía Láctea. Tampoco pueden provenir de galaxias demasiado lejanas, ya que en su viaje hacia nosotros se degradaría su energía por interacción con la así llamada radiación cósmica de fondo, que son fotones de muy baja energía remanentes del Big Bang y que llenan todo el espacio intergaláctico.

Al ser los rayos cósmicos partículas con carga eléctrica (protones u otros núcleos atómicos más pesados), su trayectoria se ve perturbada por los campos magnéticos que existen en la galaxia y en el espacio intergaláctico. Es por ello que los rayos cósmicos de más baja energía describen caminos muy tortuosos hasta llegar a la Tierra y la dirección de arriba no da información sobre la ubicación de sus fuentes. En cambio, los rayos cósmicos de mayores energías son desviados muy poco por los campos magnéticos, tan sólo algunos grados. Por lo tanto, su dirección de arriba debería ser cercana a la dirección de su fuente.

En el año 2007 se han dado a conocer los primeros resultados de las mediciones realizadas con el Observatorio Pierre Auger en la prestigiosa publicación *Science*. La conclusión más destacable es que los rayos cósmicos más energéticos no parecen tener la misma probabilidad de provenir de cualquier dirección del espacio, sino que hay direcciones de arriba preferenciales. Los 27 rayos cósmicos más energéticos que se han detectado con el Observatorio Pierre Auger hasta agosto de 2007 provienen en su mayoría de direcciones aproximadamente coincidentes con las posiciones de galaxias activas cercanas. Éstas son galaxias particulares, en tanto que poseen un agujero negro muy masivo en su centro, con una masa equivalente a varios millones de masas solares. Estos agujeros negros devoran grandes cantidades de materia en forma de gas y polvo interestelar de su entorno, y emiten partículas y radiación de muy alta energía. Si bien se cree que la mayoría de las galaxias posee un agujero negro en su interior, sólo una pequeña fracción de ellas tiene un núcleo activo en su centro.

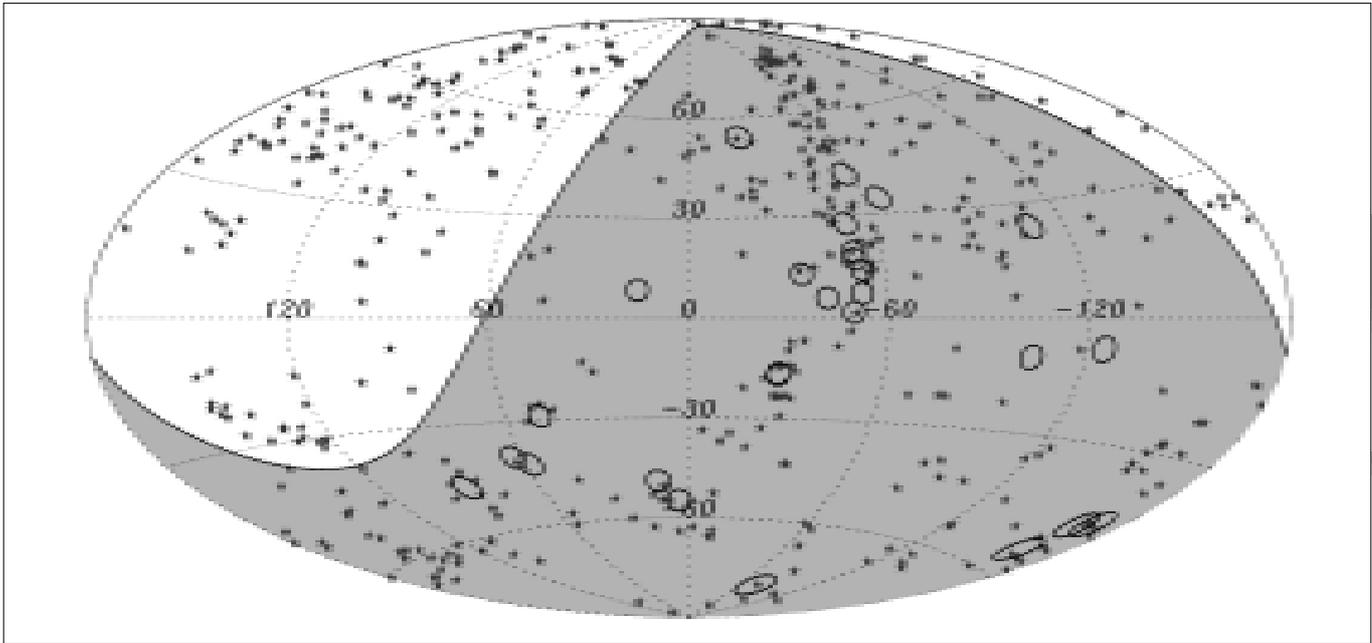


Fig. 3. Los rayos cósmicos más energéticos detectados hasta agosto de 2007 con el Observatorio Pierre Auger, representados por círculos negros. El mapa del cielo representa toda la esfera celeste, el origen del sistema de coordenadas corresponde a la dirección del centro de nuestra Galaxia y el eje horizontal, al plano galáctico. El sombreado representa la zona del cielo que es visible desde la posición del Observatorio Pierre Auger. La porción en blanco corresponde al cielo del Hemisferio Norte que no es visible desde la latitud de Mendoza. Las estrellas denotan las posiciones de las 472 galaxias con núcleo activo más cercanas a nosotros (a una distancia menor que unos 250 millones de años luz).

Estos resultados están representados en la Figura 3, en donde se muestra un mapa del cielo, con círculos que corresponden a las direcciones de arriba de los 27 rayos cósmicos más energéticos detectados por el Observatorio Pierre Auger, con energías superiores a los $5,7 \times 10^{19}$ electronvoltios (recordemos que el electronvoltio es una medida de energía usual en la física de partículas elementales, que corresponde a la energía cinética que gana un electrón cuando es acelerado en una diferencia de potencial de 1 voltio). Al analizar este mapa, podemos apreciar que la coincidencia entre los círculos y las posiciones de algunas galaxias activas es notable a simple vista.

Con los datos recolectados hasta el presente no se puede afirmar si los rayos cósmicos de las más altas energías efectivamente son producidos por galaxias cercanas con núcleos activos o si sus fuentes son otros objetos celestes con una distribución similar a la de galaxias activas cercanas. Para ello será necesario seguir acumulando datos durante los próximos años. Sin

embargo, los resultados obtenidos hasta el presente poseen un particular atractivo: con la verificación de que los rayos cósmicos de las más altas energías aportan información sobre sus fuentes, se abre una nueva ventana hacia el universo. Ya no sólo es posible obtener imágenes del cielo en distintas frecuencias de radiación electromagnética, sino que a partir del Observatorio Pierre Auger será posible hacer astronomía basada en la observación de partículas cargadas. Una vez identificadas las fuentes, el estudio de las desviaciones en las direcciones de llegada de los rayos cósmicos nos permitirá también comprender mejor los campos magnéticos presentes en su trayectoria.

En Malargüe continúa la operación del observatorio y la recolección de datos en forma estable. También se están realizando diversas ampliaciones de sus capacidades, introduciendo nuevos métodos de detección, ampliando el rango de energías de los rayos cósmicos primarios que pueden detectarse y desarrollando nuevas tecnologías, como el estudio de la factibilidad de detección de las señales de radio que producen las lluvias atmosféricas extendidas.

Lecturas sugeridas

Allekotte, I. y Gómez Berisso, M. 2005. Observando los rayos cósmicos de las más altas energías. *Desde la Patagonia, difundiendo saberes*. 2: 38-41.

The Pierre Auger Collaboration. 2007. Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects. *Science*. 318: 939-943.