

El Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger

Jaime Álvarez-Muñiz y Enrique Zas, para la Colaboración Pierre Auger

Introducción

El descubrimiento de la radiactividad natural por parte de Henri Becquerel en 1896 fue uno de los hechos que impulsó la revolución en la física que se produjo a comienzos del siglo XX, apoyada en teorías nuevas como la mecánica cuántica y la relatividad. En un principio se pensó que la radiactividad natural procedía de desintegraciones espontáneas en la superficie de la Tierra y, para constatar esta hipótesis, en 1912 el físico austriaco Victor Hess ascendió en globo a unos 5400 metros de altura para comprobar si efectivamente la radiación disminuía al alejarse de la superficie terrestre. Sin embargo para su sorpresa y en contra de dicha hipótesis, el ritmo de descarga de sus cámaras de ionización resultó aumentar rápidamente con la altura por encima de un km. Esto constituyó la primera evidencia de que existía una radiación ionizante procedente del exterior por cuyo descubrimiento Victor Hess recibió el premio Nobel de Física en 1936. Posteriormente Robert A. Millikan pensando que esta radiación estaba constituida fundamentalmente por rayos gamma (fotones), los denominó *Rayos Cósmicos*. Más adelante se comprobaría que las partículas se desviaban en el campo magnético terrestre y que por tanto tienen carga eléctrica. Hoy sabemos que la mayoría son protones y núcleos más pesados completamente ionizados.

En 1938 el físico francés Pierre Auger descubrió los llamados *chubascos atmosféricos* al observar que detectores de partículas en la superficie terrestre separados hasta trescientos metros de distancia, registraban señales prácticamente simultáneas con una frecuencia muy superior a la esperada en el caso de que las coincidencias fueran fortuitas. El fenómeno sólo puede explicarse si las señales registradas en los detectores son producidas por radiación secundaria que se origina a partir de una única partícula muy energética que interacciona poco después de entrar en la atmósfera. En esta interacción se crean muchas partículas que a su vez vuelven a interaccionar de tal forma que el número de partículas prolifera de manera exponencial a medida que van penetrando en la atmósfera. Cuando la energía de la primera partícula es elevada, prácticamente todas las secundarias son ultrarelativistas y mantienen aproximadamente la dirección de la partícula original llegando al suelo en un intervalo de unos pocos microsegundos. Pierre Auger no sólo había descubierto una nueva forma de detectar rayos cósmicos a partir de la búsqueda de señales sincronizadas en la superficie terrestre, sino que además había descubierto las partículas más energéticas conocidas hasta entonces, estimando que su energía debería ser de unos 10^{15} eV, mucho mayor que la de las partículas estudiadas hasta entonces.

A pesar de que varios de los primeros descubrimientos en Física de Partículas se realizaron gracias a la observación de

la radiación cósmica – por ejemplo el positrón, el muon y los piones se descubrieron de esta manera – con el advenimiento de los aceleradores de partículas terrestres en los años 50, se perdió parte del interés en la radiación cósmica. Al fin y al cabo la radiación cósmica es un fenómeno natural sobre el que no se tiene ningún control. Sin embargo a finales del siglo XX el interés en las partículas cósmicas más energéticas experimentó un importante resurgimiento. Este interés se canalizó con el diseño y construcción de un nuevo detector, el Observatorio Pierre Auger. El objetivo fundamental es el de estudiar la radiación cósmica de energías extremadamente altas – por encima de 10^{18} eV hasta energías incluso superiores a 10^{20} eV – con una estadística y precisión sin precedentes. El proyecto original contempla dos observatorios ubicados en los hemisferios Norte y Sur de la Tierra para cubrir de forma aproximadamente uniforme toda la esfera celeste. El Observatorio del hemisferio Sur en la provincia de Mendoza en Argentina está ya prácticamente terminado (mediados de 2008) y ha estado tomando datos desde enero de 2004 ininterrumpidamente a medida que se iba construyendo. Aunque los primeros datos han salido ya a la luz, estamos todavía empezando a entender unos resultados que sin duda alguna van a marcar el campo de la Astrofísica de Partículas en los próximos años y determinar su futuro a medio plazo. El Observatorio del hemisferio Norte se construirá en Estados Unidos en el estado de Colorado.

El objeto de este artículo es describir el diseño y funcionamiento del Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger y explicar los resultados obtenidos hasta el momento [1].

Motivación

El interés en el estudio de las partículas cósmicas más energéticas engloba a físicos de dos disciplinas, la Física de Partículas y la Astrofísica. Por una parte las interacciones se producen a energías que no son alcanzables en aceleradores terrestres con tecnologías convencionales y que por lo tanto nos permiten la observación de interacciones fundamentales en condiciones extremas. Esto es una motivación para el estudio detallado de la radiación cósmica, al margen de dónde y cómo se produce, que puede aportar nuevas pistas sobre los modelos de interacciones de la materia. Desde el punto de vista de la Astrofísica la motivación reside en los propios mecanismos de producción o de aceleración que se desconocen por completo. Los procesos de aceleración convencionales implican campos magnéticos que mantienen a las partículas confinadas en una región. Dicho confinamiento es apenas posible para la gran mayoría de objetos astrofísicos. Se necesitan grandes campos magnéticos en unos volúmenes muy grandes para poder explicar la aceleración a estas ener-

gías. Otras soluciones menos convencionales que postulan que los rayos cósmicos de energías más altas se producen por desintegración de partículas muy masivas, conducen a soluciones que tendrían una trascendencia enorme desde el punto de vista de la física fundamental. La motivación tiene mucho que ver con el poco conocimiento que tenemos sobre estas partículas, que sin embargo tienen un alto potencial de descubrimiento.

Otro de los intereses fundamentales en la detección de partículas de energías extremadamente altas y que además lo vincula a la Cosmología, radica en que sabemos que partículas de energías superiores a unos 4×10^{19} eV han de interactuar con el fondo de microondas – la radiación remanente del Big Bang que dio origen al universo. En este proceso se produce una degradación de su energía que depende de su naturaleza y de la distancia recorrida y que impide que partículas muy energéticas puedan proceder de distancias muy grandes. Si los primarios fueran protones el mecanismo dominante de interacción con el fondo es fotoproducción (principalmente producción de un pión y un nucleón) lo que provocaría la supresión del espectro. Este es el efecto GZK predicho en 1966 por K. Greisen, e independientemente por G. Zatsepin y V. Kuz'min. La degradación se produce en una escala de unos trescientos millones de años luz (100 Mpc), unas diez mil veces mayor que el radio de nuestra Galaxia. En el caso de que los primarios fueran núcleos más pesados las interacciones con el fondo de microondas se deberían producir a distancias incluso más cortas. El estudio del espectro de energías en esta región cobra un interés especial ya que este efecto tiene que reflejarse en su estructura. Además, debido a las interacciones con el fondo de microondas se producen también fotones y neutrinos de altas energías que pueden ser detectados. Es por ello que la búsqueda de estas partículas recibe mucha atención, ya que puede contribuir a identificar las fuentes de esta radiación.

En el último año el interés en la radiación cósmica de más alta energía se ha extendido al campo de la Astronomía. La radiación cósmica está constituida fundamentalmente por partículas cargadas, y éstas se desvían en los campos magnéticos galáctico y extragaláctico¹. Sin embargo la trayectoria de una partícula en un campo magnético se hace cada vez más recta a medida que aumenta su energía. Dependiendo de la intensidad del campo magnético, de la carga eléctrica de las partículas y de la distancia recorrida, las partículas más energéticas pueden llegar a retener la dirección en la que se produjeron y así apuntar casi directamente a su fuente, dando lugar a una nueva forma de astronomía con partículas cargadas, complementaria a la astronomía convencional realizada con partículas neutras (fotones principalmente).

La forma del espectro de energía y la distribución de las direcciones de llegada así como su interpretación, está influenciada en mayor o menor grado por la distribución espacial y evolución temporal (cosmológica) de las posibles fuentes, por la composición de las partículas primarias y por la intensidad de los campos magnéticos galácticos e intergalácticos, además de depender del comportamiento de

las interacciones hadrónicas a energías muy superiores a las establecidas con aceleradores. Desafortunadamente nuestros conocimientos sobre todas estas cuestiones es muy limitado. Distintas facetas del Observatorio Pierre Auger pueden ayudar a desacoplar la interconexión entre los distintos efectos y contribuir así a solucionar un problema que está entre los principales del campo desde hace ya varias décadas.

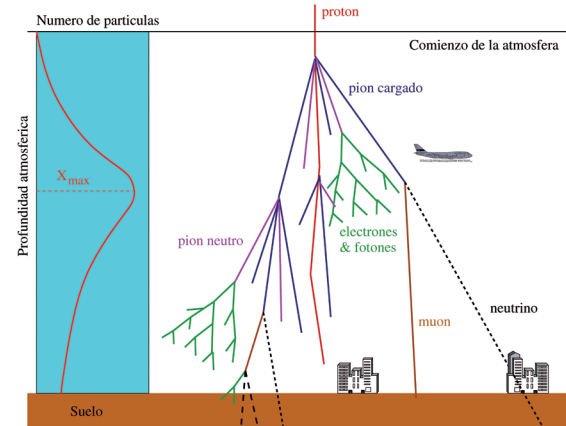


Figura 1. Principales interacciones y componentes de un chubasco de partículas en la atmósfera. En el panel de la izquierda se representa esquemáticamente el número de partículas como función de la profundidad, observándose que crece rápidamente hasta llegar a una profundidad $X_{\max}$ a la que se alcanza el máximo del chubasco.

Detección de chubascos de partículas

En las interacciones que se producen en un chubasco de partículas, que son originalmente de tipo hadrónico, se crean gran cantidad de piones que a su vez reinteraccionan o se desintegran produciendo muones, electrones y fotones. Los fotones y los electrones sufren principalmente interacciones electromagnéticas dando lugar a más electrones, positrones y fotones, constituyendo lo que se denomina un subchubasco electromagnético (Figura 1). El frente contiene básicamente fotones, electrones (o positrones) y muones en proporción muy aproximada de 100:10:1.

La técnica de detección de rayos cósmicos a partir de la observación de chubascos de partículas se refinó posteriormente a su descubrimiento por parte de Pierre Auger. Suponiendo que el frente de partículas es casi plano (con una ligera curvatura) perpendicular a la dirección de la partícula incidente y que viaja a la velocidad de la luz, resulta bastante sencillo determinar la dirección de la partícula incidente utilizando los tiempos de llegada en detectores que muestrean el chubasco cuando llega al suelo (Figura 2).

La distribución de las partículas en el frente es aproximadamente radial, máxima en el eje de la cascada (que coincide con la dirección de la partícula original) llegando a alcanzar distancias radiales de más de 4 km en el suelo para los primarios más energéticos. El número total de partículas es aproximadamente proporcional a la energía – un electrón (positrón) por GeV. Estudiando la distribución espacial de la señal producida por el frente en los detectores, se determina la energía del primario. Para hacer esto es necesario conocer en detalle el comportamiento del chubasco, tarea en la que se ha trabajado de forma continuada desde los años 50, tanto desde el punto teórico, como experimental y más recientemente utilizando complejas simulaciones numéricas. El

¹ El radio de curvatura de un protón de 10^{18} eV en un campo magnético de $1 \mu\text{Gauss}$ es aproximadamente 1 kpc (3200 años-luz), mucho mayor que la escala de distancias en las que es importante la influencia del campo magnético terrestre.

procedimiento de obtención de la energía del primario está firmemente establecido y se han llegado a detectar partículas con energías superiores a 10^{20} eV, una cantidad espectacular para una partícula elemental².

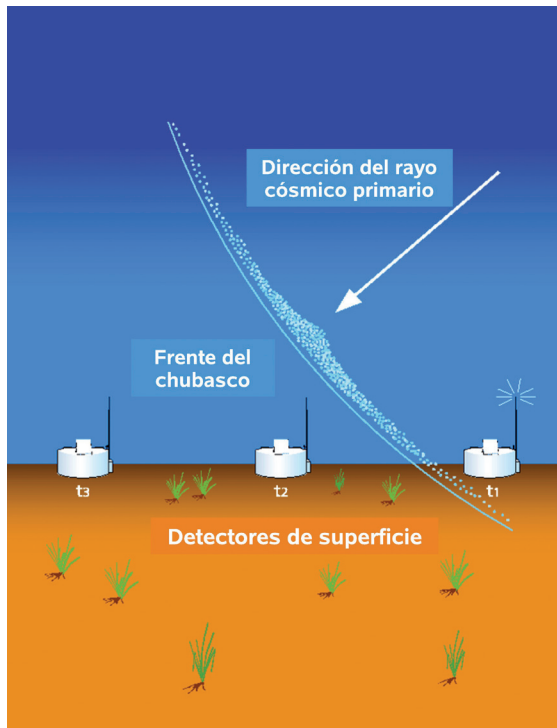


Figura 2. En este esquema el frente de partículas ultrarrelativistas que constituye un chubasco atmosférico es muestreado por detectores de partículas situados a nivel del suelo, registrándose el tiempo en el que el frente llega a cada uno de los detectores.

Un método alternativo para la detección de chubascos muy energéticos, desarrollado con éxito en los años 80, consiste en la observación de la luz fluorescente emitida isotrópicamente en la desexcitación de las moléculas de nitrógeno atmosférico inmediatamente después de pasar el frente. La cantidad de luz es en muy buena aproximación proporcional a la energía del chubasco. Dicha luz – unos 4 fotones en el azul-ultravioleta por metro de traza de partícula cargada – se puede detectar con un telescopio en superficie siempre y cuando la energía del chubasco sea suficientemente elevada. El método de detección permite reconstruir cómo evoluciona el número de partículas del chubasco con la profundidad y la posición del máximo (Figura 1). Con esta técnica también se han registrado partículas de energías muy elevadas – más de 10^{20} eV aunque existen ciertas discrepancias entre los resultados de ambos tipos de experimentos [2].

El Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger

El Observatorio Pierre Auger Sur es el observatorio de radiación cósmica de energía extremadamente alta – por encima de 10^{18} eV – más grande y más sofisticado del mundo. Se encuentra en la provincia de Mendoza (Argentina) muy cerca de la localidad de Malargüe a 1400 m sobre el nivel

del mar en una región denominada Pampa Amarilla. Su ubicación en el hemisferio sur terrestre permite la observación de regiones del cielo donde se encuentran algunas de las fuentes más violentas del Universo que nos rodea, como por ejemplo el centro Galáctico, el cluster de Centauro o el cluster de Virgo. La peculiaridad del Observatorio Pierre Auger con respecto a otros detectores de radiación cósmica es que se combinan en un mismo detector las dos técnicas de observación de chubascos de partículas explicadas anteriormente, dando lugar a lo que se ha denominado un detector híbrido.



Figura 3. Uno de los 1600 tanques de agua que constituyen el detector de superficie del Observatorio Pierre Auger. Se puede ver al fondo uno de los edificios de fluorescencia, con las cubiertas 3 de los 6 telescopios de fluorescencia cerradas para proteger los fotomultiplicadores de la luz del día.

El detector de superficie del Observatorio Pierre Auger

Cuando esté completo – a mediados de 2008 – el detector de superficie del Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger constará de 1600 estaciones Cherenkov – tanques cilíndricos llenos de agua – formando una red hexagonal en la que cada tanque se sitúa a una distancia de 1.5 km de sus 6 vecinos más próximos. En total el detector abarcará una superficie de unos 3000 km² aproximadamente igual a la superficie de la isla de Tenerife (Figura 4). Cada tanque tiene 1.2 m de altura y 3 m de diámetro y contiene 12 m³ de agua purificada en su interior. En su diseño ha primado entre otras cosas la robustez con el fin de minimizar el número de visitas de mantenimiento a cada uno de ellos. Debido a la gran distancia entre tanques y a la enorme superficie en la que se extienden, se han diseñado como unidades totalmente independientes, conteniendo una electrónica de muy bajo consumo (aproximadamente 10 W), un GPS para medir el tiempo y una radio con una antena para comunicaciones, elementos todos ellos alimentados por dos paneles solares y dos baterías muy similares a las que lleva un coche. En la Figura 3 se muestra una fotografía de un tanque de agua.

La técnica de detección se basa en la observación de la radiación emitida por efecto Cherenkov en agua por parte de las partículas del chubasco que entran en el tanque. Esta luz azulada se emite cuando una partícula supera la velocidad de la luz en el medio en el que se propaga, en este caso en agua. La radiación Cherenkov se recoge en 3 fotomultiplicadores

² Comparado con la energía de un electrón de un receptor clásico de TV, acelerado en un campo del 10^4 Voltios, la de estas partículas es 10^{16} veces superior, una relación similar a la energía liberada por una bomba atómica de hidrógeno de las más potentes comparada con la de una cerilla.

(PMT) situados en el interior del tanque, que la transforman en una corriente eléctrica, y ésta a su vez se digitaliza como función del tiempo mediante conversores de señales analógicas a digitales (FADC) en intervalos de 25 ns. La señal se expresa en unidades de VEM (Vertical Equivalent Muon) que corresponde a la señal producida por un muon que atraviese el tanque verticalmente y por el centro del mismo. La conversión de cuentas de FADC a VEM depende de muchos factores que cambian de tanque a tanque e incluso con el tiempo debido a cambios en las propiedades del agua, propiedades de los PMTs, temperatura, etc... Por este motivo todos y cada uno de los tanques se calibran cada pocos minutos mediante la detección de los abundantes muones que atraviesan cada tanque (unos 1500 por tanque cada segundo) producidos mayoritariamente en chubascos atmosféricos de energías por debajo del umbral de energía del detector de superficie. Los tanques son además monitorizados de manera continua para detectar posibles fallos en sus distintos elementos y proceder a su mantenimiento. En particular se miden distintos parámetros de los paneles solares y baterías lo que convierte al Observatorio Pierre Auger en uno de los mayores sistemas fotovoltaicos completamente monitorizados del mundo.

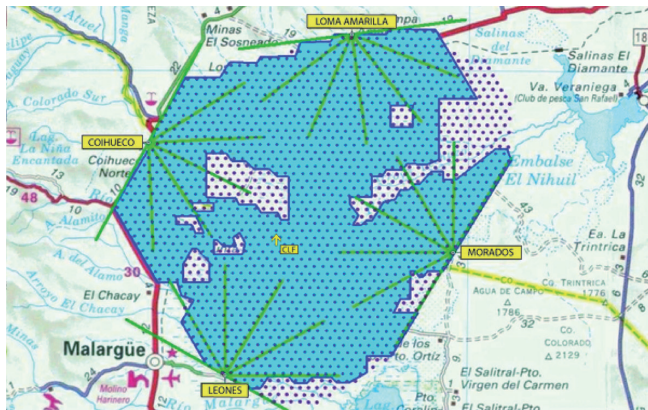


Figura 4. Esquema del Observatorio Pierre Auger Sur a 30 de septiembre de 2007. Los puntos representan las posiciones de las 1600 estaciones Cherenkov que se planea instalar, y el área azul representa la superficie en la que se extienden los detectores en funcionamiento por aquel entonces. También se representan en el perímetro los 4 edificios cada uno de ellos albergando 6 telescopios de fluorescencia. Las líneas que salen de cada edificio de fluorescencia representan el campo de visión de cada telescopio de fluorescencia. La flecha situada en el medio de la red de detectores indica la posición de la instalación central de un láser (CLF) que se utiliza para monitorización de las propiedades de la atmósfera y calibración de los telescopios de fluorescencia.

Los tanques se transportan a su posición en el detector de superficie sin agua y sin electrónica, a continuación se llenan de agua y finalmente se les instala la electrónica. En el momento de escribir este artículo se habían transportado ya 1592 tanques, prácticamente la totalidad de los planeados, de los que 1481 están ya tomando datos.

La red de tanques muestrea el frente del chubasco de partículas cuando llega al suelo. Cada vez que se supera un determinado umbral de señal en un tanque (“trigger” local) se transmite por radio la señal y el tiempo en el que se produjo el trigger al edificio central del Campus Auger en Malargüe donde se alberga el sistema central de adquisición de datos (CDAS). En ese momento el CDAS busca dentro de

una ventana de tiempo los tanques con señal y construye un trigger global requiriendo una configuración relativamente compacta en espacio y tiempo de tanques disparados – el primer indicio de la presencia de un chubasco atmosférico extenso que ha llegado al suelo. Dependiendo del tipo de trigger local se necesitan al menos 3 ó 4 tanques disparados para que los datos se graben en disco para su posterior análisis. Esencialmente es la distancia entre tanques la que determina el umbral energético de detección, cuanto más energético sea el primario más se extiende el chubasco radialmente en el suelo y por tanto más tanques disparará. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de un chubasco real.

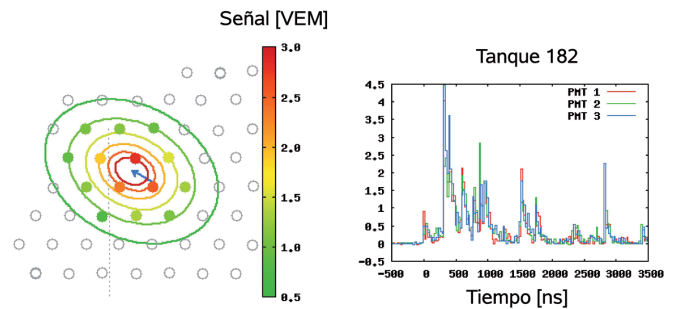


Figura 5. Ejemplo de un chubasco real (evento 1234800) que ha disparado 14 tanques del detector de superficie. Se muestra también una de las señales medidas en uno de los tanques y digitalizada en tiempo. La reconstrucción del evento ha arrojado una energía de aproximadamente $3,7 \times 10^{19}$ eV y un ángulo cenital con respecto a la vertical al suelo de 43°

Otra peculiaridad de las estaciones Cherenkov, es que al ser tanques cilíndricos llenos de agua, son muy sensibles a partículas que llegan muy horizontales con respecto a la vertical del suelo. Esto convierte al detector de superficie del Observatorio Pierre Auger en un excelente detector de chubascos inclinados que son aquellos que inciden en la superficie terrestre con un ángulo $\theta > 60^\circ$ con respecto a la vertical al suelo. Estos chubascos se diferencian de los chubascos verticales – aquellos que llegan con $\theta < 60^\circ$ – en que debido a la gran cantidad de atmósfera que tienen que atravesar antes de llegar al suelo la componente electromagnética se encuentra prácticamente absorbida y sólo los muones que son mucho más penetrantes llegan al suelo (Figura 10).

El detector de fluorescencia del Observatorio Pierre Auger

En el perímetro de la red de tanques de agua se sitúan cuatro edificios que albergan los llamados telescopios de fluorescencia, un edificio en (aproximadamente) cada punto cardinal. Cada edificio contiene 6 telescopios que apuntan hacia el volumen de atmósfera que se encuentra encima de la red de estaciones Cherenkov cubriendo una porción del cielo de aproximadamente $30^\circ \times 30^\circ$ (Figura 3). Los telescopios recogen la luz ultravioleta (UV) producida a varios km de distancia cuando las partículas del chubasco excitan las moléculas del nitrógeno presente en la atmósfera. La luz UV se focaliza mediante espejos esféricos de 3 m^2 de área en una cámara de 440 PMTs como se puede apreciar en la Figura 6. De esta manera se mide la traza de luz que deja el chubasco al atravesar el cielo, a partir de la cual se puede reconstruir

la dirección de llegada del rayo cósmico así como la energía del chubasco, que es proporcional a la cantidad de luz recolectada. A causa de la extrema sensibilidad de los PMTs el detector de fluorescencia sólo puede trabajar por la noche y sólo en noches sin luna, aproximadamente entre un 10 y un 15% del tiempo que trabaja el detector de superficie. En la actualidad los 24 telescopios de fluorescencia están finalizados y en funcionamiento.

La calibración del detector de fluorescencia y el conocimiento de las propiedades ópticas de la atmósfera en cada momento es crucial. La atmósfera sobre la red de tanques Cherenkov es probablemente uno de los volúmenes de atmósfera mejor monitorizados del mundo. Este volumen se observa con monitores de infrarojos para la detección de nubes, globos sonda para medir la presión y la temperatura como función de la altura, así como mediante disparos de láser con el objetivo de medir las propiedades de absorción de la atmósfera en cada momento.

Finalmente merece la pena mencionar que además de hardware la Colaboración Pierre Auger ha diseñado y desarrollado una serie de herramientas específicas de software para la adquisición, calibración, reconstrucción y análisis de datos.

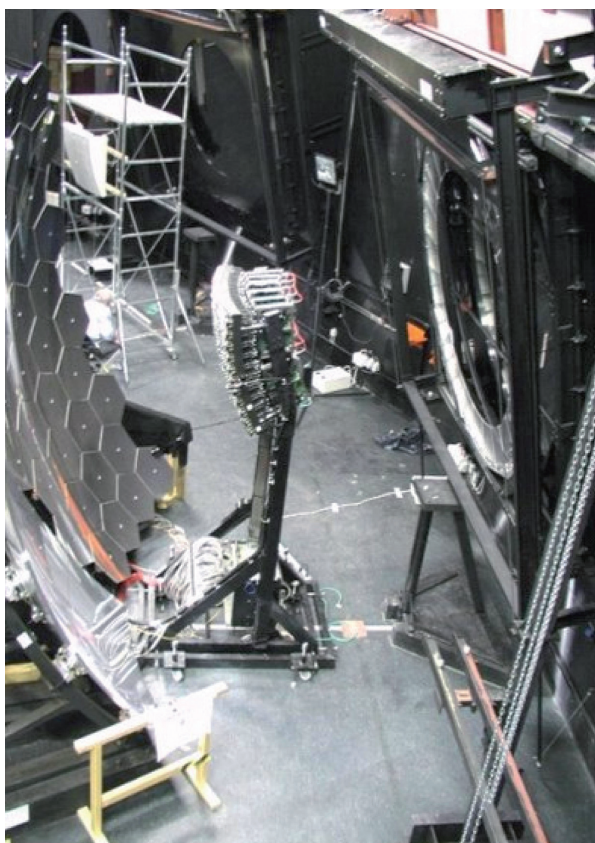


Figura 6. Interior de uno de los 4 edificios que albergan 6 telescopios de fluorescencia cada uno. Se aprecia a la derecha la abertura por la que entra la luz fluorescente y a la izquierda el espejo esférico que la focaliza en la cámara con 440 PMTs en el centro de la figura.

5. El nacimiento de la era híbrida

El Observatorio Pierre Auger es un observatorio único en el mundo. En él se combinan las dos técnicas más desarrolladas en la actualidad para la detección de rayos cósmicos

de muy alta energía: redes de detectores en la superficie terrestre y telescopios de fluorescencia. Este carácter híbrido del observatorio presenta enormes ventajas en la consecución de los objetivos del observatorio, puesto que de manera simultánea se pueden medir varios de los observables de los chubascos de partículas, en algunos casos con redundancia y con mayor precisión que con cualquiera de las dos técnicas por separado (Figura 7). La detección híbrida es además crucial para minimizar las incertidumbres sistemáticas que afectan a cada una de las técnicas de detección. Por ejemplo, mediante la detección híbrida de un chubasco se consigue una resolución en la determinación de la dirección de llegada del rayo cósmico que lo origina de aproximadamente $0,5^\circ$ (en promedio). Esto automáticamente hace que los sucesos híbridos sean de gran utilidad para comprobar y mejorar los algoritmos de reconstrucción angular que se aplican a la mayoría de los sucesos registrados en el observatorio, y que sólo se miden con el detector de superficie debido a la imposibilidad de operar el detector de fluorescencia durante el día.

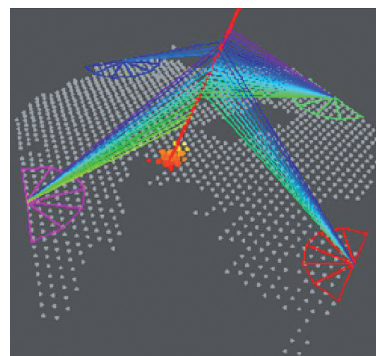


Figura 7. Chubasco híbrido iniciado por un rayo cósmico de aproximadamente 10^{19} eV de energía y que fue observado simultáneamente por telescopios de los 4 edificios de fluorescencia y por el detector de superficie.

Además de la dirección del rayo cósmico que inicia el chubasco, otro observable de gran importancia es su energía. La determinación de la energía en aquellos sucesos registrados únicamente con el detector de superficie es una tarea complicada debido a que sólo se muestrea el chubasco de partículas cuando llega al suelo. Esto hace que se necesiten simulaciones Monte Carlo lo más detalladas y realistas posible para poder relacionar las señales que dejan las partículas en los tanques Cherenkov con la energía del rayo cósmico. Desafortunadamente este procedimiento no está exento de incertidumbres sistemáticas, asociadas principalmente al desconocimiento del comportamiento preciso de los procesos de interacción hadrónica del rayo cósmico en la atmósfera a las energías típicas de los rayos cósmicos medidos en Auger – por encima de 10^{18} eV –, varios órdenes de magnitud mayores que las energías a las que existen medidas realizadas en los aceleradores terrestres. Es aquí donde el detector híbrido vuelve a probar su utilidad. En aquellos sucesos registrados por los dos detectores, la energía se puede determinar de manera directa con las medidas de fluorescencia que permiten establecer como se deposita la energía del chubasco en la atmósfera. Al igual que en un calorímetro, la energía se obtiene integrando en profundidad la energía depositada.

Por otro lado y para los mismos chubascos, el detector de superficie proporciona las señales en los tanques Cherenkov. De esta manera se determina directamente la relación entre las señales y la energía sin necesidad de recurrir a simulaciones y con muy poca incertidumbre sistemática asociada a nuestro desconocimiento de la naturaleza de las partículas o de las interacciones hadrónicas. Esta relación se utiliza para determinar la energía de la mayoría de los sucesos registrados en el observatorio, detectados únicamente con la red de tanques Cherenkov.

Existen otros ejemplos en los que la aplicación de la técnica híbrida está siendo de gran utilidad para mejorar la precisión en la determinación de las propiedades del rayo cósmico primario que inicia el chubasco. Estudiando el subconjunto de los eventos que se pueden reconstruir con ambas técnicas se puede optimizar la búsqueda de los parámetros más sensibles para cualquier estudio. Esto permite aprovechar de forma mucho más eficaz los datos del detector de superficie que son mucho más abundantes por operar de forma ininterrumpida día y noche. El potencial de la técnica híbrida todavía está por aprovecharse en toda su extensión y de hecho ésta es una de las tareas más importantes y a las que se está dedicando más esfuerzo dentro de la colaboración Pierre Auger.

Resultados recientes

Los tres objetivos principales del observatorio son la determinación del espectro energético³ de los rayos cósmicos de energías extremadamente altas – por encima de 10^{18} eV – con una precisión y estadística sin precedentes, obtener las direcciones de llegada de las partículas más energéticas y tratar de establecer su naturaleza. Con la estadística recogida hasta el momento, y que equivale aproximadamente a la que acumularía el observatorio en un año de operación si estuviera completo, se han obtenido los primeros resultados acerca de estos tres objetivos.

Espectro energético de los rayos cósmicos de energía extremadamente alta.

El carácter híbrido del Observatorio Pierre Auger y la sensibilidad del detector de superficie a chubascos tanto verticales ($\theta < 60^\circ$) como horizontales ($\theta > 60^\circ$), permite la medida simultánea del espectro de rayos cósmicos de 3 maneras distintas.

El espectro se mide con gran estadística por medio del detector de superficie usando chubascos verticales. Para ello se necesita determinar la energía de los chubascos y el área efectiva del detector de superficie tal que si un chubasco cae sobre ella será detectado. Se ha demostrado que el mejor estimador de la energía de un chubasco vertical es la señal que deja el chubasco a una distancia radial de 1000 m del punto donde impactaría el rayo cósmico si se propagase a lo largo de la dirección de llegada hasta el suelo (el llamado punto de impacto del chubasco). Esta señal se relaciona con la energía del chubasco por medio de sucesos híbridos en los que se han medido la señal por medio del detector de super-

ficie y la energía por medio del detector de fluorescencia. Así se establece una relación que resulta ser lineal entre la energía medida y la señal, y que se utiliza para la asignación de la energía de los chubascos que solo ve el detector de superficie. La gran ventaja de este novedoso procedimiento es que se minimiza la incertidumbre asociada al desconocimiento del comportamiento de las interacciones hadrónicas a muy alta energía. Hasta septiembre de 2007 se habían detectado aproximadamente 12000 chubascos verticales con energía superior a 3×10^{18} eV.

El espectro también se mide en el Observatorio Pierre Auger mediante la detección de chubascos inclinados ($\theta > 60^\circ$). Los chubascos inclinados están formados principalmente por muones que llegan al suelo y tienen por tanto propiedades físicas distintas de los chubascos verticales. Debido a ello los chubascos inclinados, además de aumentar la estadística, proporcionan una medida independiente del espectro de rayos cósmicos. La mayor dificultad reside en que debido a la inclinación de los chubascos se rompe la simetría radial (circular) en el suelo característica de los chubascos verticales y por lo tanto no se puede usar como estimador la señal recogida a una distancia radial fija puesto que depende del ángulo acimutal en el suelo. Se define entonces un nuevo estimador que es básicamente el número total de muones que llega al suelo integrado a todas las distancias radiales. Este observable se obtiene a partir del ajuste de las densidades de muones en el suelo a distribuciones bidimensionales de densidades de muones obtenidas mediante simulaciones Monte Carlo. El estimador de la energía en chubascos horizontales se relaciona de nuevo de manera lineal con la energía medida por el detector de fluorescencia en sucesos inclinados e híbridos. El número de chubascos inclinados representa aproximadamente el 30% de los chubascos verticales. Hasta septiembre de 2007, se habían detectado 734 chubascos inclinados ($60^\circ < \theta < 80^\circ$) y energía superior a $6,3 \times 10^{18}$ eV.

Otra de las grandes ventajas de usar el detector de superficie para la medida del espectro es que el cálculo del área efectiva de detección es directa y esencialmente geométrica y se realiza simplemente contando en cada momento cuantos tanques están funcionando correctamente y comunicándose con el sistema central de adquisición de datos. Esta información se conoce gracias a la monitorización continua de las estaciones Cherenkov. Los espectros obtenidos con el detector de superficie se han calculado para energías en las que más del 98% de los sucesos producen una señal en el detector, reduciendo la incertidumbre asociada al área efectiva a un mínimo.

Por último se puede medir también el espectro usando únicamente sucesos híbridos incluyendo aquellos en los que el chubasco dispara al menos un tanque. Aunque la cantidad de chubascos híbridos es mucho más pequeña que la de chubascos verticales u horizontales, la ventaja radica en que en general la precisión en la determinación de la dirección de llegada y posición del punto de impacto en los sucesos híbridos es mayor. Otra de las ventajas de un espectro híbrido es que permite reducir el umbral de detección puesto que chubascos de relativamente baja energía ($< 3 \times 10^{18}$ eV), muchos de los cuales no pasan el trigger de chubasco del detector de superficie, sin embargo sí se observan con el detector de

³ Número de partículas que inciden en la atmósfera terrestre por unidad de área, tiempo y ángulo sólido

fluorescencia siempre y cuando se produzcan relativamente cerca del mismo. Hasta septiembre de 2007 se habían detectado 1092 chubascos híbridos.

En la Figura 8 se muestra el espectro de rayos cósmicos obtenido mediante la medida de chubascos verticales, horizontales e híbridos. El acuerdo entre los 3 espectros es muy bueno dentro de las incertidumbres estadísticas y sistemáticas asociadas a su medida. De acuerdo con el espectro medido en el Observatorio Pierre Auger a 10^{20} eV el flujo de rayos cósmicos es aproximadamente de 2 por km^2 y por milenio.

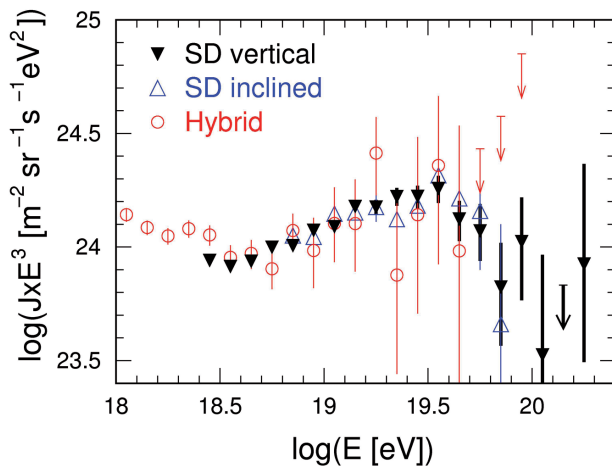


Figura 8. Espectro energético de los rayos cósmicos medido en el Observatorio Pierre Auger usando chubascos verticales, inclinados e híbridos. El espectro se ha multiplicado por una potencia de la energía E^3 para resaltar las características espectrales y para que sea más fácil comparar visualmente los 3 espectros.

Uno de los resultados más importantes del Observatorio Pierre Auger es la observación de la supresión del espectro con respecto a una ley de potencias de exponente constante $E^{-2.6}$, que comienza a una energía compatible con la predicha por Greisen, Zatsepin y Kuz'min aunque los resultados son todavía prematuros como para extraer conclusiones definitivas.

Composición de los rayos cósmicos de energía extremadamente alta.

Típicamente los modelos de producción de rayos cósmicos predicen que éstos pueden ser protones, núcleos completamente ionizados, fotones o incluso neutrinos. El tipo de primario que inicia el chubasco se puede identificar en promedio por medio del diferente poder de penetración en la atmósfera. De esta manera los detectores tanto de superficie como de fluorescencia del Observatorio Pierre Auger son sensibles al tipo de primario que inician los chubascos de muy alta energía. Uno de los observables que presenta mayor sensibilidad a la composición de los rayos cósmicos es la profundidad en la atmósfera a la que el chubasco alcanza el máximo en el número de partículas (X_{max} , ver Figura 1). Los fotones dan lugar a chubascos que en promedio tienen un X_{max} mayor que el de los iniciados por protones, que a su vez tienen un X_{max} medio mayor que el de chubascos iniciados por núcleos más pesados.

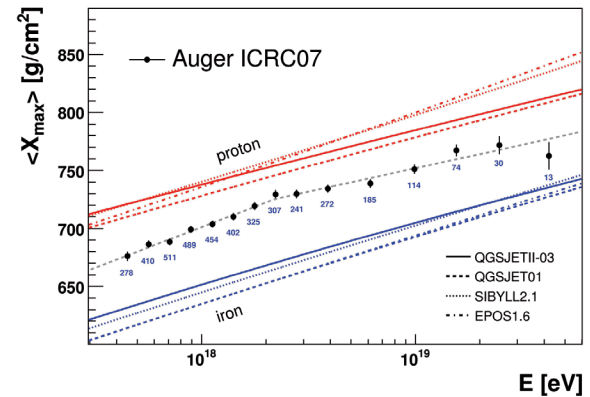


Figura 9. Valor medio de X_{max} – profundidad medida desde el comienzo de la atmósfera a la que el chubasco iniciado por un rayo cósmico alcanza el máximo en el número de electrones y positrones – como función de la energía. Los puntos corresponden a los datos medidos de Auger, la barra de error incluye tanto incertidumbres sistemáticas como estadísticas. El número de chubascos en cada bin de energía se indica debajo de cada dato experimental. Las líneas corresponden a las predicciones de X_{max} obtenidas mediante simulación Monte Carlo utilizando distintos tipos de primarios (protón y hierro) y distintos modelos de extrapolación a muy altas energías del comportamiento de las interacciones hadrónicas. Se puede ver que X_{max} es sensible al tipo de primario que inicia el chubasco.

Sin embargo sólo se puede medir X_{max} de manera directa y con precisión con el detector de fluorescencia con la desventaja de que la estadística sólo es el 10 – 15% de la que se recoge en el detector de superficie. Por este motivo la colaboración Auger está realizando grandes esfuerzos en la obtención de observables sensibles a la naturaleza del primario y que además sean medibles con el detector de superficie. En cualquiera de los casos la interpretación de estas medidas no es sencilla porque es necesario confiar en las predicciones de códigos Monte Carlo de chubascos cuyos resultados son inciertos debido a nuestro desconocimiento de las interacciones hadrónicas a las energías típicas de los primarios que detecta Auger.

A continuación se presentan los resultados más importantes del Observatorio Pierre Auger en lo que se refiere a la determinación de la naturaleza del primario.

Protones y núcleos

En la Figura 9 se muestra la comparación del promedio de X_{max} medido como función de la energía del rayo cósmico, con los resultados de varios códigos de simulación Monte Carlo que utilizan distintas extrapolaciones del comportamiento de las interacciones hadrónicas (sección eficaz de colisión hadrón-aire, etc...). Si los modelos de interacción hadrónica son correctos, los datos parecen estar indicando que la composición no está dominada por protones a las energías más altas y de hecho parece que el promedio del número atómico de los elementos que forman los rayos cósmicos crece con la energía. Esto tiene profundas implicaciones en los modelos de producción de rayos cósmicos, puesto que muchos de ellos predicen que no debería de haber núcleos más pesados que el hidrógeno (protón) en la radiación cósmica a energías extremadamente altas.

Fotones

Las medidas de $X_{\max}$ también se pueden utilizar para la determinación de la presencia de fotones de energía extremadamente alta.

La existencia de fotones de energías extremadamente altas en el flujo de rayos cósmicos se predice en muchos modelos de producción, en particular en los llamados modelos "top-down" que proponen que los rayos cósmicos son el producto de la desintegración de partículas muy masivas reliquias del universo primitivo.

Los fotones dan lugar a chubascos con un marcado carácter electromagnético en los que la energía se disipa de forma menos eficaz y que por tanto son más penetrantes (mayor $X_{\max}$) que los chubascos iniciados por protones o por núcleos más pesados. En esta idea se fundamenta la cota superior a la fracción de fotones de alta energía en la radiación cósmica, obtenida analizando los datos recogidos en el detector de fluorescencia, y que establece que esta fracción es inferior al 16% para energías por encima de 10^{19} eV.

Sin embargo el detector de fluorescencia está limitado a trabajar durante la noche y sin luna con lo cual acumula una estadística que es 10 veces menor que la recogida por el detector de superficie. En el empeño de usar observables que se puedan medir con el detector de superficie y que sean sensibles a la presencia de fotones en el flujo de rayos cósmicos primarios, se ha determinado mediante técnicas de simulación Monte Carlo que la duración en tiempo de la señal en los tanques y la curvatura del frente del chubasco cuando llega al suelo son dos buenos indicadores de la profundidad a la que se produce y, por tanto, son sensibles a la naturaleza del primario. Podemos imaginarnos un chubasco como un frente de partículas casi esférico que se propaga radialmente desde el punto donde el rayo cósmico interacciona y en el que las partículas están retrasadas en tiempo unas con respecto a otras (Figura 2). Cuanto mayor sea la profundidad a la que el chubasco alcanza el máximo menor será su radio de curvatura al llegar al suelo y también más extensas en tiempo serán las señales recogidas por los tanques. Esta es la base para determinar si un chubasco fue iniciado por un fotón mucho más penetrante que un chubasco iniciado por un protón o un núcleo más pesado (Figura 9). Siguiendo este procedimiento no se ha encontrado ningún chubasco compatible con fotón y se ha establecido un límite a la presencia de fotones en el flujo de rayos cósmicos. Menos del 2%, 5% y 31% de los rayos cósmicos son fotones a energías por encima de 10^{19} eV, 2×10^{19} eV y 4×10^{19} eV respectivamente. Es interesante mencionar que también aquí los sucesos híbridos en los que se conoce la profundidad del máximo y la extensión en tiempo de las señales, han probado ser cruciales para la calibración de esta técnica de determinación de la composición de los rayos cósmicos primarios.

Neutrinos

El detector de superficie del Observatorio Pierre Auger también es sensible a neutrinos de energías extremadamente altas. Los neutrinos son partículas neutras que por tanto no sufren desviaciones en los campos magnéticos galáctico o intergaláctico y viajan en línea recta desde la fuente en la que fueron producidos hasta nosotros. Por este motivo son

candidatos ideales para hacer astronomía. Por otra parte los neutrinos presentan la dificultad de que son extremadamente difíciles de detectar, debido a que sus interacciones están gobernadas por la fuerza débil y presentan una probabilidad de interaccionar con la materia muy baja. A esto hay que añadir que el flujo de neutrinos a energías extremadamente altas se cree que es muy pequeño. Esto hace que la detección sea extremadamente complicada – de hecho todavía no se ha detectado ningún neutrino de energías superiores a 10^{14} eV – y por tanto se necesitan enormes volúmenes de material detector para maximizar la probabilidad de observación. Existen muchos modelos de producción de neutrinos entre los que cabe destacar los neutrinos subproductos de las interacciones de rayos cósmicos de energías extremadamente altas con el fondo de microondas (los llamados neutrinos del GZK).

En el Observatorio Pierre Auger se utilizan dos métodos para la detección de neutrinos. Por un lado se buscan neutrinos de los tres sabores conocidos (electrónico, muónico y tauónico) que interaccionan en la atmósfera terrestre dando lugar a un chubasco de partículas que viaja *hacia abajo* con relación al detector de superficie (Figura 10), este trabajo está en fase de desarrollo. Por otro lado se buscan también los llamados neutrinos rasantes. Éstos son neutrinos del tipo tauónico que interaccionarían en la corteza terrestre dando lugar a un leptón τ , que se propaga en el interior de la Tierra, llegando a abandonar la corteza terrestre entrando en la atmósfera y pudiéndose desintegrar en vuelo cerca del detector produciendo un chubasco que se propaga *hacia arriba* con respecto al detector de superficie (Figura 10).

Desde el punto de vista experimental, el mayor reto radica en distinguir chubascos iniciados por neutrinos de los mucho más abundantes chubascos iniciados por protones o núcleos más pesados, o incluso fotones. La identificación se basa en una idea relativamente sencilla: Mientras que protones, núcleos y fotones interaccionan al poco de entrar en la atmósfera debido a que sus interacciones están gobernadas por fuerzas intensas como la fuerte para los dos primeros y la electromagnética para estos últimos, los neutrinos pueden atravesar toda la atmósfera e interaccionar muy cerca del detector dando lugar a un chubasco muy profundo (Figura 10). La observación de chubascos inclinados aumenta considerablemente la probabilidad de identificación de neutrinos puesto que los chubascos inclinados iniciados por protones o núcleos son esencialmente frentes muónicos sin componente electromagnética dado que ésta se absorbe casi completamente en la atmósfera (Figura 10). Sin embargo los chubascos inclinados de neutrinos que se producen muy cerca del detector de superficie, sí van a tener una componente electromagnética relativamente importante. Por tanto el criterio para identificar neutrinos entre los datos recogidos en el detector de superficie del Observatorio Pierre Auger es buscar chubascos inclinados con una fracción importante

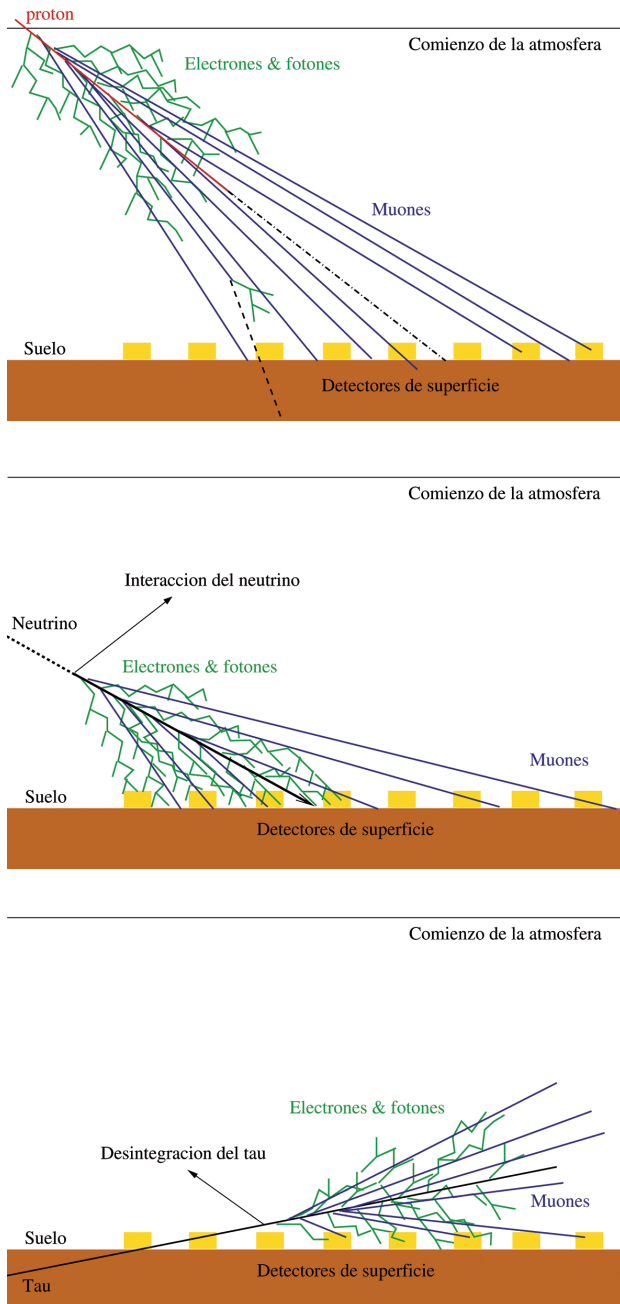


Figura 10. Método de detección de neutrinos de alta energía en el detector de superficie del Observatorio Pierre Auger. Panel superior: Chubasco inclinado iniciado por un protón en el que la componente de electrones y fotones se ha absorbido prácticamente en la atmósfera y sólo los muones llegan al suelo. Panel medio: Chubasco profundo *hacia abajo* iniciado por un neutrino que interacciona en la atmósfera. Panel inferior: Chubasco profundo *hacia arriba* que se origina en la interacción de un neutrino del tipo tauónico dentro de la corteza terrestre, interacción en la que se produce un leptón τ que al desintegrarse sobre el detector da lugar al chubasco. En chubascos iniciados por neutrinos se espera que una fracción importante de la señal se deba a electrones y fotones.

de señal producida por la componente electromagnética. En la práctica esto se consigue analizando la extensión temporal de las señales: un frente muónico produce señales muy concentradas en el tiempo, puesto que los muones viajan en línea casi recta y llegan al tanque casi al mismo tiempo. Por el contrario los electrones no viajan en línea recta y de hecho experimen-

tan desviaciones múltiples al encontrarse con las moléculas de nitrógeno u oxígeno atmosférico. Por ello, un frente electromagnético produce señales extensas en el tiempo.

Esta es la idea base para la búsqueda de neutrinos entre los datos recogidos en el detector de superficie del Observatorio Pierre Auger. El resultado es que no se han encontrado candidatos a neutrinos entre los datos analizados (hasta septiembre de 2007), estableciéndose una cota superior al flujo de neutrinos de tipo tauónico. Esta cota – aunque pone en serias dificultades a algunos modelos teóricos de producción de neutrinos – está todavía a aproximadamente un orden de magnitud por encima del flujo esperado de neutrinos del GZK.

Origen de los rayos cósmicos de energía extremadamente alta.

La identificación directa de las fuentes de la radiación cósmica es uno de los principales retos de la física de rayos cósmicos. La búsqueda de anisotropías en la distribución de las direcciones de llegada de los rayos cósmicos es una de las herramientas más importantes para lograr este objetivo. En general y debido a los campos magnéticos galáctico e intergaláctico, los rayos cósmicos no siguen trayectorias rectas desde las fuentes en las que fueron producidos hasta nosotros, lo que hace que la búsqueda de las fuentes sea una tarea muy difícil. Sin embargo se espera que a medida que aumenta la energía de los rayos cósmicos, se debería incrementar la probabilidad de correlación entre las direcciones de llegada y las posiciones de las fuentes.

La colaboración Pierre Auger ha realizado una extensa búsqueda de posibles correlaciones y recientemente ha publicado una correlación entre los rayos cósmicos de energías por encima de aproximadamente 6×10^{19} recogidos hasta septiembre de 2007 y las posiciones de Núcleos de Galaxias Activos (AGN). La correlación se obtiene para los AGN más cercanos, los eventos más energéticos y admitiendo pequeñas desviaciones. De los 27 sucesos de energía por encima de $5,7 \times 10^{19}$ eV – es decir por encima de la energía del corte GZK – 19 de ellos están a menos de $3,1^\circ$ en el cielo de un AGN conocido y detectado por otros medios, localizado a menos de 75 Mpc de distancia de nosotros. Es más, de los 8 sucesos cuyas direcciones no apuntan a ningún AGN, 6 de ellos están a menos de 12° del plano galáctico detrás del cual se espera que existan también AGNs pero que no han sido observados porque la gran concentración de materia en el plano galáctico no permite su observación por medios ópticos.

La probabilidad de que esta correlación ocurra de manera fortuita se ha calculado meticulosamente dada la importancia del resultado, estableciendo primero los parámetros de la correlación y comprobándolos con datos totalmente independientes recibidos posteriormente a la fecha en la que se detectó la primera señal. De esta forma se rechaza a un nivel de confianza del 99% la hipótesis de que las direcciones de llegada de los rayos cósmicos de las energías más altas estén distribuidas de manera isotrópica en el cielo. En la Figura 11 se muestra el mapa del cielo en coordenadas galácticas junto con las posiciones de los 27 rayos cósmicos de más alta energía y las posiciones de los AGN que se encuentran a menos de 75 Mpc de la Tierra [3].

Este es un resultado de gran importancia ya que es la primera vez que se observa una correlación clara entre fuentes astrofísicas y las direcciones de llegada de los rayos cósmicos de las energías más altas. Los AGN son fuentes muy violentas que se han postulado como posibles aceleradores de rayos cósmicos de energías extremadamente altas. Las direcciones de llegada de los rayos cósmicos son totalmente incompatibles con el plano galáctico y por ello estas observaciones permiten afirmar que se trata de radiación de origen extragaláctico.

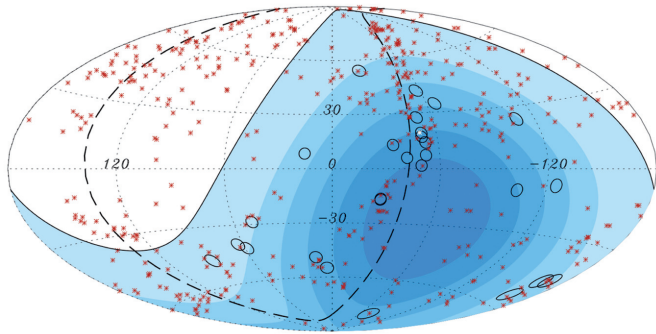


Figura 11. Proyección aítoff de la esfera celeste en coordenadas galácticas. Los círculos (de $3,1^\circ$ de radio) están centrados en las posiciones de las direcciones de llegada de los 27 rayos cósmicos detectados en Auger hasta septiembre de 2007. Los asteriscos rojos indican las posiciones de los 472 AGN identificados que se encuentran a una distancia de menos de 75 Mpc de nosotros. La línea de guiones indica la posición del plano supergaláctico donde se concentran la mayor parte de las galaxias más próximas a la Tierra. La cruz blanca indica la posición de Centauro A, uno de los AGN más cercanos, a aproximadamente 4.3 Mpc de distancia. Las zonas en color azulado indican la región del cielo accesible desde el Observatorio Pierre Auger del hemisferio sur.

Perspectivas

El Observatorio Pierre Auger está arrojando sus primeros resultados después de que la colaboración Pierre Auger hiciese un esfuerzo enorme para terminar la construcción del observatorio del hemisferio Sur. España ha jugado un papel muy relevante dentro de la colaboración, en la que participan 17 países, tanto en la construcción, responsabilizándose de la fuente de energía fotovoltaica de las estaciones, como en el análisis de datos. La incorporación formal de nuestro país fue en 2002 a propuesta del grupo de Santiago de Compostela que había hecho aportaciones sobre detección de neutrinos y chubascos inclinados con el observatorio. Posteriormente se incorporaron grupos de tres Universidades, Alcalá de Henares (2005), Complutense de Madrid (2005) y Granada (2007) y un miembro del IFIC de Valencia (CSIC) asociado a Santiago (2007). Entre las muchas aportaciones de los grupos españoles cabe destacar el análisis de chubascos inclinados y la búsqueda de neutrinos (Santiago-IFIC), el estudio de fluorescencia y composición de la radiación cósmica (Complutense de Madrid), la reconstrucción de eventos con el detector de fluorescencia (Alcalá), y la simulación de los tanques de agua (Granada).

Los resultados del Observatorio Pierre Auger están ya arrojando mucha luz en un campo en el que se espera ayuden a resolver cuestiones de gran relevancia en Astrofísica de Partículas. No obstante queda mucho por hacer. Los resultados obtenidos han de ser interpretados, las incertidumbres

reducidas y la potencia del detector híbrido, en parte todavía por descubrir, ha de ser explotada al máximo. Existe además la previsión de completar el Observatorio Sur con detectores adicionales que extiendan la calidad y/o el rango de las medidas realizadas. En concreto se va a construir una subred más densa de detectores de superficie, se va a ampliar uno de los edificios de fluorescencia con nuevos telescopios para poder medir el desarrollo de cascadas menos energéticas, se van a construir detectores específicos de muones y se está explorando la posibilidad de detección de chubascos mediante antenas de radio. Durante los próximos años se planteará también el proyecto del nuevo observatorio para el Hemisferio Norte, que se construirá en Lamar, Colorado, en los Estados Unidos, posiblemente mucho mayor en extensión que el del hemisferio Sur. Por último, en los años venideros la cantidad de datos recogidos va a multiplicarse proporcionalmente al tiempo y, debido a ello, la actividad de la colaboración va a verse fuertemente incrementada. Es por ello necesario que haya suficiente número de investigadores – jóvenes y más senior – en los grupos participantes trabajando tanto en las distintas facetas del observatorio, como en los desarrollos planeados para el futuro.

Agradecimientos

Nuestras investigaciones se financian gracias a varias instituciones, organismos y programas:

- Ministerio de Educación y Ciencia (FPA2004-01198 y FPA2007-65114) y programa Consolider-Ingenio 2010, CPAN (CSD2007-00042)
- Xunta de Galicia (2005 PXIC20604PN y PGIDIT 06 PXIB 206184 PR); Consellería de Educación (Grupos de Referencia Competitivos – Consolider Xunta de Galicia 2006/51);
- Fondos Feder y programa Alpha de la Unión Europea éste último a través de la High-Energy Physics Latin-European Network (HELEN).
- J.A-M está financiado por el programa “Ramón y Cajal” del Ministerio de Educación y Ciencia, España.
- Agradecemos también al Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA) por permitirnos la utilización de sus recursos computacionales.

References

- [1] *The Pierre Auger Collaboration*. Contribuciones a la 30th International Cosmic Ray Conference, ICRC 2007, Mérida, México. Disponibles en el siguiente enlace: <http://indico.nucleares.unam.mx/conferenceDisplay.py?confId=4>
- [2] M. NAGANO Y A.A. WATSON, *Rev. Mod. Phys.* **72**, 689 (2000) y referencias en este artículo.
- [3] J. ABRAHAM ET AL. [The Pierre Auger Collaboration] *Science* **318**, 938 (2007).

Jaime Álvarez-Muñoz y Enrique Zas
están en el Departamento de Física de Partículas &
Instituto Galego de Altas Enerxías de la Universidade de
Santiago de Compostela