

COLABORACIONES EN FÍSICA

LAS PARTÍCULAS MÁS ENERGÉTICAS
DE LA NATURALEZA

¿Cuáles son las partículas más energéticas que existen en la naturaleza? Ante esta pregunta muchos lectores estarán quizá pensando en el LHC, el «Large Hadron Collider», recientemente puesto en marcha y que será capaz de producir haces de protones con energía extremadamente alta. Efectivamente en el LHC se espera conseguir protones de 7 TeV de energía, es decir 7×10^{12} eV. Nunca antes se había podido alcanzar, en un acelerador hecho por el hombre, tan alta energía. De hecho esta energía tiene dimensiones macroscópicas puesto que es del orden de 1 μ J (7×10^{12} eV $\times 1,6 \times 10^{-19}$ J/eV = $1,1 \times 10^{-6}$ J). Por compararlo con un objeto macroscópico familiar diremos que es aproximadamente igual a la energía cinética de un mosquito de 60 mg volando a 20 cm/s. El vuelo de un inofensivo mosquito puede parecer poca cosa pero pensemos en que esa energía cinética está siendo (será) transportada por una única partícula elemental (fig. 1). Sin embargo, no son éstas las partículas más energéticas que existen en la naturaleza. Las partículas con mayor energía que han sido detectadas provienen del espacio. Se trata de los rayos cósmicos, en



Figura 1. El gran colisionador de hadrones LHC en el CERN podrá acelerar protones hasta una energía de 7 TeV. Cada protón tendrá la misma energía cinética que un mosquito en vuelo, 1 μ J.

concreto de una pequeñísima fracción de la radiación cósmica; y es que se han detectados partículas con energías superiores a 10^{20} eV, es decir, varios órdenes de magnitud superior a la de los protones de LHC. En este caso corresponde a una energía de aproximadamente 50 J (fig. 2). Para hacerse una idea práctica de lo que representa diremos que es similar a la de un saque de tenis en el que una pelota de 56 g se acelera hasta una velocidad de 150 km/h. Obviamente la energía del saque de tenis es incomparablemente superior a la del inofensivo mosquito.



Figura 2. Algunos rayos cósmicos que llegan a la Tierra transportan tanta energía como la que se comunica a una pelota de tenis en un saque, 50 J.

¿Qué son estas partículas?, ¿cómo se descubrieron?, ¿cómo se detectan?, ¿cómo se puede medir su energía? Intentaremos en este artículo responder de manera breve a estas preguntas. Pero también nos haremos otras, como ¿cuál es el origen de estas partículas?, ¿en qué objetos cósmicos se generan?, ¿cómo pueden acelerarse hasta alcanzar tan alta energía?. Desgraciadamente aún estamos lejos de poder responder con precisión a estas últimas preguntas.

EL DESCUBRIMIENTO DE LOS RAYOS
CÓSMICOS

Tradicionalmente se atribuye el descubrimiento de la radiación cósmica al físico austriaco Victor Hess que en

una serie de vuelos en globo que realizó durante 1912 (fig. 3) comprobó que la señal de ionización de fondo que los electros copios registraban, aun en aparente ausencia de fuentes radiactivas, aumentaba con la altura en vez de disminuir, como sería de esperar si esta señal proviniera de fuentes naturales en la Tierra. Una vez descartadas otras posibles explicaciones se llegó a la conclusión de que esta radiación provenía de arriba, es decir, del exterior de la Tierra. Este experimento supuso el nacimiento de la Física de Rayos C ósmicos, bautizados con este nombre por Millikan (1925). El experimento de Hess mostr ó además el gran poder de penetración de esta radiación. Por este motivo muchos científicos (entre ellos Millikan) supusieron que debían ser rayos γ . Una serie de brillantes experimentos realizados por Skobelzyn (1925), Bothe y Kolhörster (1937), Neddermeyer y Anderson (1937) y Street y Stevenson (1937) demostraron que esta radiación penetrante consistía realmente en partículas cargadas similares a los electrones, pero de mucha mayor masa. En estos experimentos se emplearon

cámaras de niebla, detectores Geiger y, por primera vez, la técnica de coincidencias. Fue algo más tarde, empleando emulsiones nucleares, cuando en 1947 el grupo de Bristol (Lattes, Muirhead, Occhialini y Powell) descubrió el pión y su desintegración en un muón que con una masa de 207 veces la del electrón, resulta ser la partícula penetrante que da lugar a la radiación de fondo observada por Victor Hess. Estos experimentos pudieron ser adecuadamente interpretados gracias al desarrollo de la teoría de la radiación desarrollada por Bethe y Heitler (1934). Debido a su gran masa, el poder de frenado radiativo de un muón es mucho menor que el del electrón y por tanto los muones resultan ser extraordinariamente penetrantes.

Otro importante hito en la historia del descubrimiento de los rayos cósmicos fue la observación de las llamadas cascadas atmosféricas extensas. En 1938, Pierre Auger (fig. 4) y sus colegas de la Escuela Normal Superior de París observaron coincidencias entre señales producidas en contadores Geiger que se encontraban sepa-

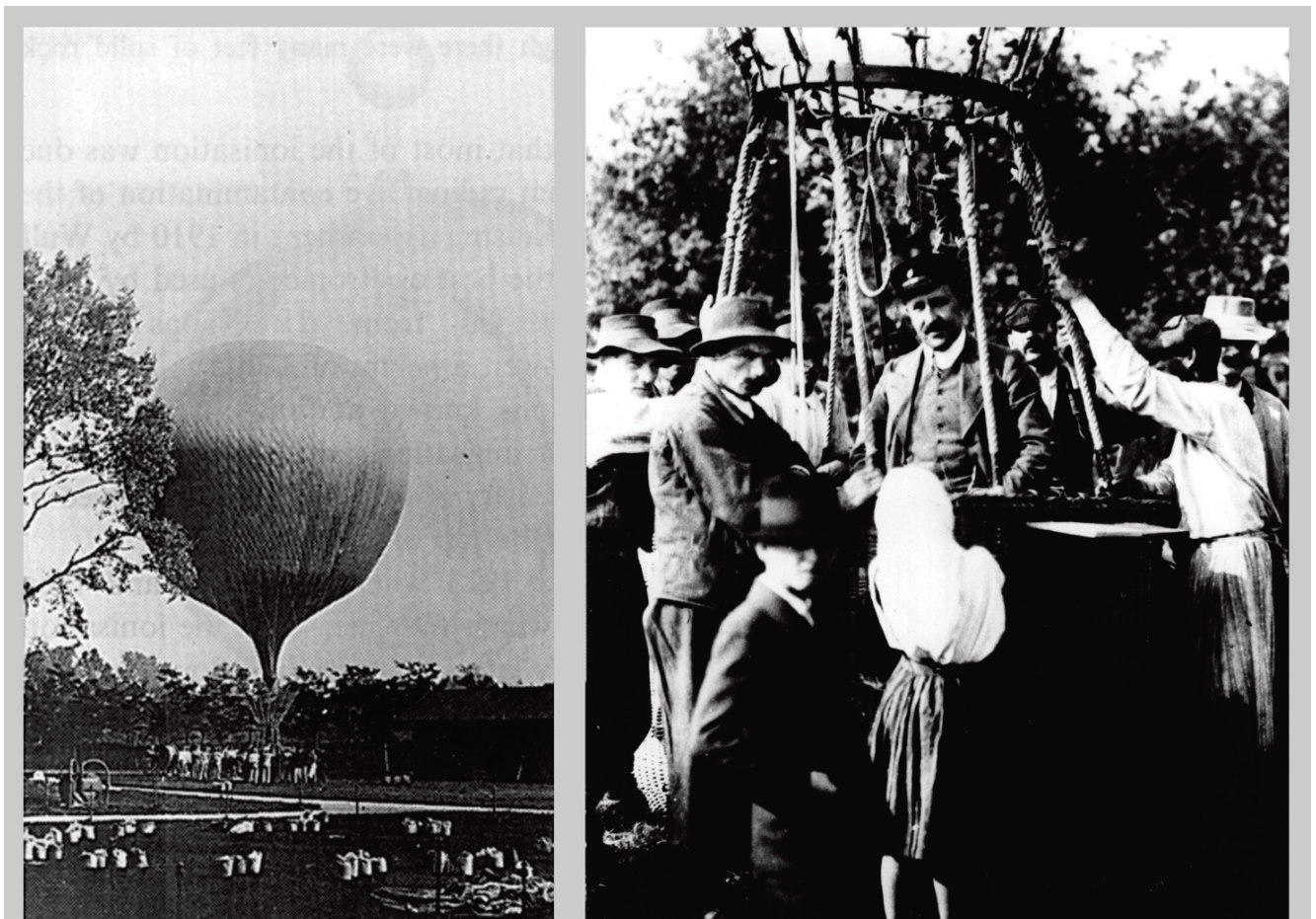


Figura 3.- Victor F. Hess aterriza tras su histórico vuelo a 5.300 metros el 7 de agosto de 1912 (derecha). Preparativos para uno de sus vuelos (izquierda) [1].

rados por distancias de hasta 150 metros. La teoría de las llamadas **cascadas electromagnéticas** había sido desarrollada poco antes por Babha y Heitler (1937) y Carlson y Oppenheimer (1937). Cuando un rayo γ de alta energía atraviesa la materia se convierte en un par electrón – positrón ($e^- - e^+$) y éstos a su vez generan rayos γ por el efecto conocido como *bremsstrahlung*. El proceso se repite dando lugar a una cascada de partículas (rayos γ , e^+ , e^-). Debido a las numerosas colisiones elásticas de los electrones y positrones con los núcleos del medio la extensión física de esta cascada aumenta con la distancia recorrida.

Las medidas de Auger resultaron ser compatibles con una cascada electromagnética generada a lo largo de la atmósfera por un rayo γ con energía del orden de 10^{15} eV. Fue un resultado sorprendente para la comunidad científica pues nunca antes se había observado una partícula tan extraordinariamente energética. Piénsese que la energía típica de los electrones en los átomos varían entre 1 y 10^3 eV (keV) y la de las radiaciones asociadas a los fenómenos nucleares son del orden de 10^6 eV (MeV).

Sin embargo, en una cascada electromagnética no se producen los piones y muones observados pocos años más tarde por el grupo de Bristol. La combinación de ambas observaciones permitió ajustar las piezas del rompecabezas. La Tierra está sometida al constante bombardeo de núcleos atómicos desnudos (sin electrones), en su mayor parte protones. Ésta es la conocida como *radiación cósmica primaria*. Al penetrar en la atmósfera, cada uno de estos rayos cósmicos primarios interacciona con un núcleo atmosférico (nitrógeno u oxígeno) produciendo lo que se conoce como una *cascada hadrónica*, similar a la cascada electromagnética, pero en la que debido a la naturaleza de las interacciones nucleares, se producen una gran variedad de partículas elementales (fig. 5), no solo electrones, positrones y rayos γ , sino además los piones y muones observados por el grupo de Bristol, junto a muchas otras partículas. Estos productos constituyen lo que se

conoce como *rayos cósmicos secundarios*. La mayor parte de los cuales son absorbidos en la atmósfera, no así los muones que llegan al suelo debido a su gran poder de penetración unido a su relativamente larga vida media (2,2 μ s), aumentada por el efecto de la dilatación relativista.

Muchos más detalles sobre los estudios pioneros de la radiación cósmica pueden encontrarse en [1].

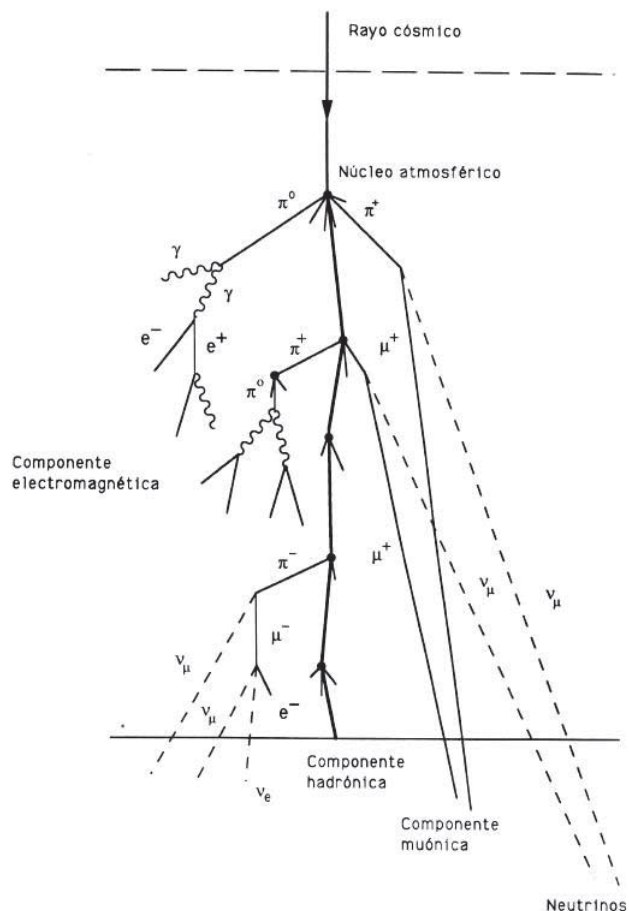


Figura 5. Cascada de partículas generada por un rayo cósmico de alta energía a su entrada en la atmósfera.

LAS MÁS ALTAS ENERGÍAS

Una pequeña fracción de los rayos cósmicos primarios posee energías tan altas que una parte muy importante de sus productos secundarios incluidos electrones, positrones y rayos γ alcanzan el suelo. Fueron cascadas de este tipo las que P. Auger observó y aunque el cálculo de 10^{15} eV de energía primaria se hizo suponiendo una cascada electromagnética, la energía de la correspondiente cascada hadrónica es similar. A estas altas ener-



Figura 4. Pierre Auger, descubridor de las cascadas atmosféricas extensas.

gías, incluso la componente electromagnética de la cascada llega al suelo y, por lo tanto, las señales que registran los detectores son en buena parte debidas a electrones y positrones. Empleando esta técnica J. Linsley observó en 1962 una cascada de partículas cuyas características indicaban una energía primaria del orden de 10^{20} eV. Esta detección conmocionó a la comunidad científica puesto que resultaba inimaginable la posibilidad de acelerar partículas hasta energías tan extraordinariamente altas.

Este resultado impulsó la construcción de otros detectores. La principal dificultad reside en el bajísimo flujo de rayos cósmicos a estas energías. El espectro de energía de los rayos cósmicos decrece según una ley de potencia $E^{-\gamma}$ (figs. 6 y 7) de tal modo que la frecuencia de llegada a la Tierra de rayos cósmicos con energía superior a 10^{15} eV es de $1 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ reduciéndose a $1 \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ a energías superiores a 10^{18} eV, no esperándose una frecuencia superior a $1 \text{ km}^{-2} \text{ siglo}^{-1}$ por encima de 10^{20} eV.

Figura 6. El espectro de energía de los rayos cósmicos sigue una ley $E^{-\gamma}$. Obsérvese el aumento en la pendiente que tiene lugar a 10^{15} eV (la rodilla). Se sospecha que pueda ser debido a un cambio en el mecanismo de aceleración. También se observa una ligera suavización a 10^{18} eV (el tobillo). A partir de esta energía el flujo de rayos cósmicos que llegan a la Tierra se hace extremadamente bajo.

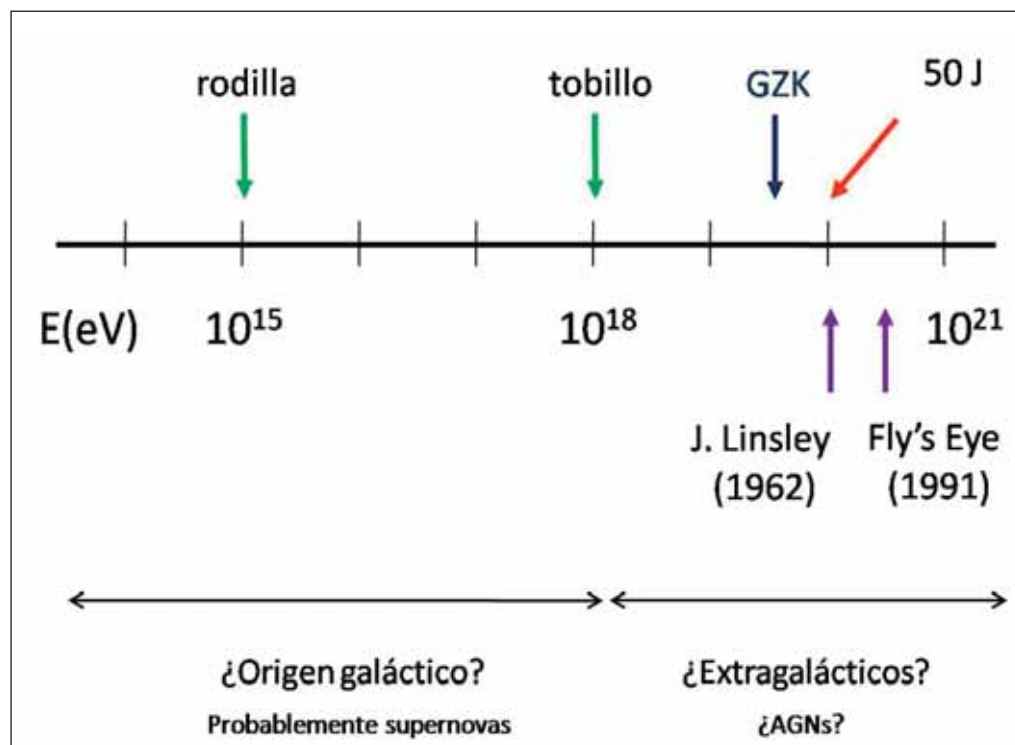
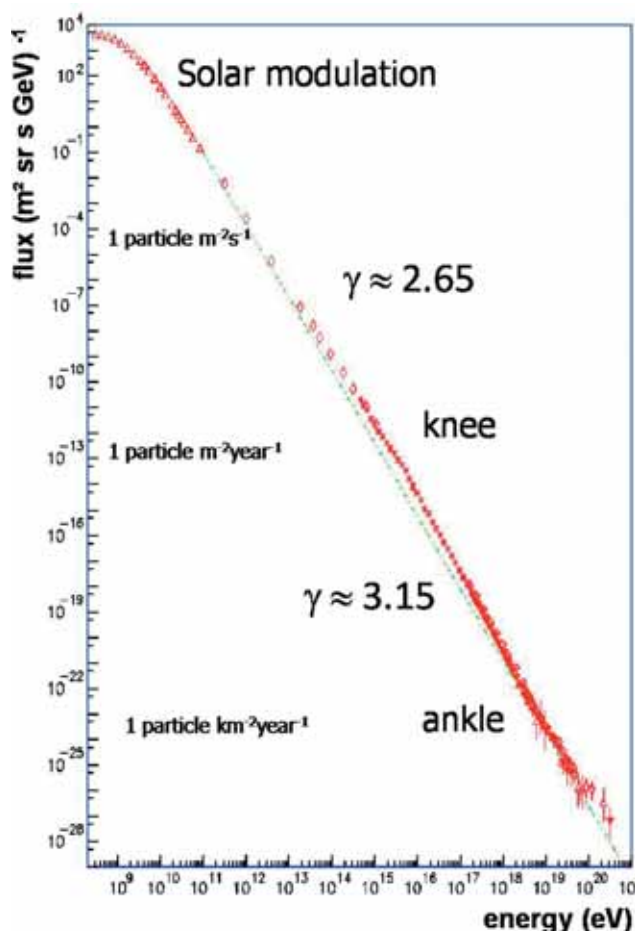


Figura 7. La escala de energías de los rayos cósmicos extremos. Se sospecha que el tobillo del espectro pueda estar relacionado con la transición de rayos cósmicos galácticos a extragalácticos. Se indica la energía del corte GZK por encima de la cual el flujo de rayos cósmicos debe disminuir sensiblemente. Sin embargo se han observado algunos rayos cósmicos con energías superiores a 50 J.

Para poder compensar el bajo flujo es necesario habilitar inmensas áreas de detección. Por ejemplo, la colaboración AGASA instaló sobre una superficie de alrededor de 100 km^2 111 centelleadores de $2,2 \text{ m}^2$ cada uno y 27 dispositivos blindados específicos para la detección de muones (fig. 8). En el año 1993 este detector registró un suceso de $2 \times 10^{20} \text{ eV}$.

Otra técnica alternativa está basada en la observación de la luz de fluorescencia producida por la cascada de partículas al atravesar la atmósfera. Las partículas cargadas, principalmente electrones/positrones excitan moléculas del nitrógeno atmosférico que en su desexcitación emiten de forma isotrópica fotones en el rango del ultravioleta próximo. De este modo, el desarrollo de una cascada iniciada por un rayo cósmico puede ser observado de manera similar a la entrada de un meteorito en la atmósfera. Un rayo cósmico de ultra-alta energía genera la luz equivalente a una bombilla de 100 W moviéndose hacia el suelo a la velocidad de la luz. Para detectar este *flash* de luz el experimento Fly's Eye usó un

gran número de espejos cubriendo cada uno una pequeña fracción del cielo. La luz de cada uno de ellos era concentrada en un fotomultiplicador (fig. 9). La detección simultánea de un *flash* luz por varios espejos a lo largo de una trayectoria sobre el cielo indicaba la penetración de un rayo cósmico en la atmósfera. La intensidad de luz de fluorescencia proporciona una medida de la energía del primario. En el año 1991 este experimento observó un rayo cósmico de $3,2 \times 10^{20} \text{ eV}$. El experimento Fly's Eye fue posteriormente ampliado pasando a denominarse HiRes (High Resolution Fly's Eye).

Para más detalles de esta sección se recomienda la referencia [2].

EL CORTE GZK

Cuatro años después de que J. Linsley detectara por primera vez un rayo cósmico ultra-energético, Greisen, e independientemente Zatsepin y Kuz'min [3] se dieron cuenta de que la radiación de fondo de microondas de-



Figura 8. Akeno Giant Air Shower Array (AGASA). Distribución en el suelo de los detectores de la cascada (derecha) y uno de los detectores individuales (izquierda).



Figura 9. Algunos de los espejos del detector de fluorescencia Fly's Eye (arriba). Uno de los telescopios del proyecto HiRes (abajo).

bería de hacer relativamente opaco al Universo para rayos cósmicos de tan alta energía. Suponiendo que estos rayos cósmicos sean protones, puede tener lugar la reacción:



con la consecuente degradación de su energía, de tal modo que para $E > 10^{20}$ eV la longitud de atenuación resulta ser inferior a 50 Mpc. Esta predicción tiene varias consecuencias trascendentales. En primer lugar, suponiendo el origen universal de estos rayos cósmicos, es de esperar un corte en el espectro a energías del orden de 5×10^{19} eV. Es decir, los rayos cósmicos con energías por encima de este valor no pueden llegar con tanta frecuencia porque una fracción significativa del Universo resulta opaca para ellos. Éste es el conocido como corte GZK.

Otra consecuencia importante está relacionada con las direcciones de llegada de estos rayos cósmicos. En principio, la distribución de direcciones de llegada de la radiación cósmica primaria es perfectamente isótropa. Esto es debido a que los rayos cósmicos antes de llegar a la Tierra atraviesan regiones del espacio en los que existen campos magnéticos con una importante componente aleatoria. Por este motivo la dirección de llegada no

tiene ninguna correlación con la fuente en donde se originó el rayo cósmico. Resulta innecesario recordar que la astronomía está basada en el hecho de que los fotones viajan en línea recta independientemente de estos campos magnéticos. De otro modo al mirar al cielo no veríamos más que un fondo luminoso uniforme.

La información que poseemos de los campos magnéticos cósmicos nos indica que los rayos cósmicos con energías superiores al corte GZK no deberían desviarse de forma importante en su camino hasta nosotros. Por tanto si se detectan rayos cósmicos por encima del corte GZK, la dirección de llegada a la Tierra debería apuntar a la fuente. ¿Sería posible la *Astronomía de Rayos Cósmicos*?

¿CUÁL ES SU ORIGEN?

Aunque aún no se han identificado de forma precisa las fuentes, es muy probable que estos núcleos de ultra-alta energía sean de origen extragaláctico. En cualquier caso nuestra galaxia no sería capaz de confinarlos puesto que su campo magnético no puede curvarlos suficientemente. En otras palabras, el radio de Larmor es inferior al tamaño de nuestra galaxia.

La pregunta ahora es ¿qué objetos cósmicos son capaces de acelerar núcleos hasta tan altas energías? El procedimiento más eficiente para la aceleración de rayos cósmicos es el conocido como mecanismo de Fermi de primer orden. En este modelo las partículas son aceleradas en las múltiples colisiones que pueden sufrir en ondas de choque como las que se generan en explosiones de supernovas. Sin embargo, los remanentes de supernova solo pueden explicar aceleraciones hasta $\sim 10^{15}$ eV, simplemente porque no tienen tamaño suficiente para conseguir las energías extremas. Existen otros objetos cósmicos donde se espera que se generen fuertes ondas de choque y con características (campo magnético y tamaño) más favorables para alcanzar mayores energías. Uno de los candidatos a ser fuente de rayos cósmicos de ultra-alta energía son los núcleos activos de galaxias AGN. Se trata de galaxias en las que se sospecha que alojan en su centro un agujero negro supermasivo.

Obviamente, la posibilidad de determinar de manera directa las fuentes emisoras a partir de la dirección de llegada de rayos cósmicos de suficiente energía permitiría resolver de manera inequívoca el problema. Sin embargo, para ello se necesita recolectar un gran número de

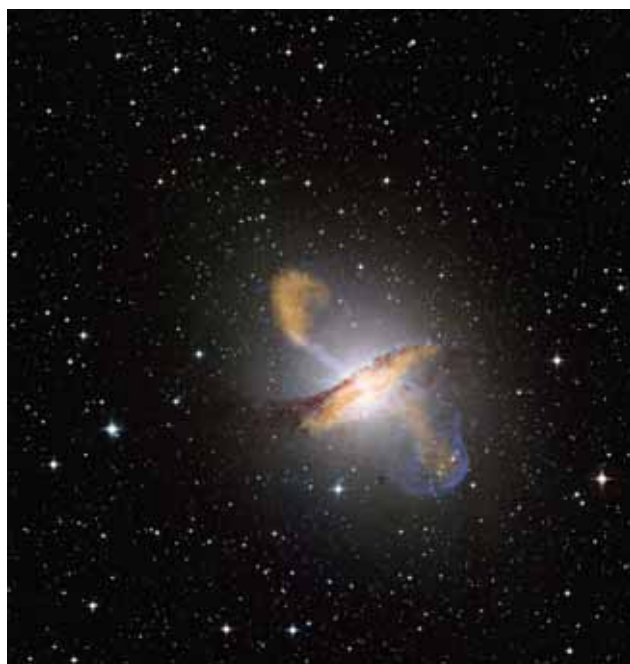


Figura 10. Centauro A contiene un núcleo galáctico activo. Ésta es una de las posibles fuentes de rayos cósmicos ultraenergéticos.

rayos cósmicos ultraenergéticos. Por lo dicho anteriormente, el hallazgo de anisotropías correlacionadas con las posiciones de AGNs sería un primer paso que podría más tarde materializarse en verdaderas detecciones cuando dispongamos de suficiente estadística.

Se han propuesto también modelos del tipo *top-down* en los que fuentes exóticas, como materia oscura superpesada o defectos topológicos, podrían generar en su desintegración rayos cósmicos ultraenergéticos. Estos modelos pueden ponerse a prueba, pues tienen implicaciones que pueden ser comprobadas experimentalmente. Por ejemplo, en estos modelos no aparece el corte GZK del espectro de energía pero se predice un alto flujo de rayos γ ultra-energéticos que deberían ser observados.

Más detalles sobre el origen de los rayos cósmicos de ultra-alta energía se pueden encontrar en [2].

ESTADO ACTUAL

El proyecto AGASA finalizó sus operaciones en enero de 2004. Los resultados obtenidos pueden básicamente resumirse en la ausencia del corte GZK en el espectro y la posible observación de anisotropía en una dirección muy próxima al centro galáctico. El experimento HiRes operó durante el periodo 1997-2006 obteniendo resultados contradictorios a los de AGASA puesto que observa-

ron el corte GZK y las direcciones de llegada resultaron compatibles con una perfecta isotropía. Es difícil interpretar estas notables discrepancias teniendo en cuenta que en ambos experimentos el número de rayos cósmicos detectados es muy bajo y además emplean técnicas experimentales muy distintas, sujetas a diferentes tipos de errores sistemáticos.

Con el objetivo de resolver este importante problema científico la colaboración internacional Pierre Auger, constituida por científicos de 17 países, ha puesto en marcha en la provincia argentina de Mendoza el mayor observatorio de rayos cósmicos del mundo. Este Observatorio, cuya construcción ha sido recientemente finalizada, ya ha proporcionado nuevos datos con mucha mayor precisión que los conocidos hasta ahora. Con el objetivo de tener acceso a todo el cielo y aumentar de forma significativa la muestra de datos, la colaboración ha propuesto la construcción de otro observatorio aún mayor en el hemisferio norte, concretamente en el estado de Colorado (USA).

EL PROYECTO PIERRE AUGER

El Observatorio

El Observatorio Pierre Auger Sur consta de dos instrumentos: Un *array*, con más de 6000 detectores ocupando una superficie de alrededor de 3000 km², y un detector de fluorescencia, con un total de 24 telescopios distribuidos entre 4 ubicaciones para observar la entrada en la atmósfera de los rayos cósmicos. Este observatorio supone un gran avance frente a sus antecesores, puesto que el *array* de superficie (fig. 11) dispone de un área de detección 30 veces superior a AGASA y el sistema de telescopios de fluorescencia (fig. 12) es significativamente más eficiente que el de HiRes. El carácter híbrido del Observatorio Pierre Auger, es decir, la capacidad de registrar los rayos cósmicos empleando de manera simultánea las dos técnicas de detección, le permite reducir de manera significativa los errores sistemáticos.

Cada técnica tiene sus ventajas e inconvenientes. Por ejemplo, los telescopios pueden medir la energía del rayo cósmico primario a partir de la luz de fluorescencia cuya intensidad es proporcional a la energía depositada en la atmósfera. En cambio un *array* de superficie necesita usar los modelos de interacción hadrónica (colisiones nucleares) para obtener la energía a partir de los productos secundarios registrados en el suelo. Estos modelos

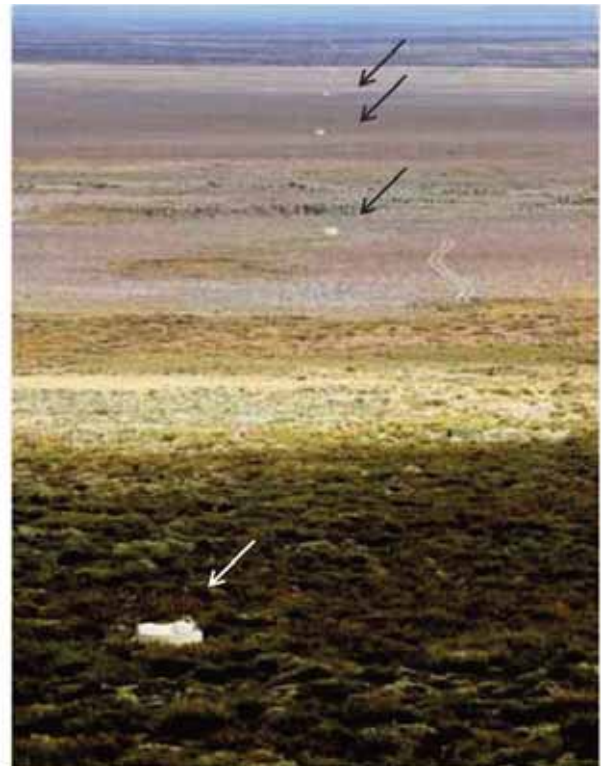
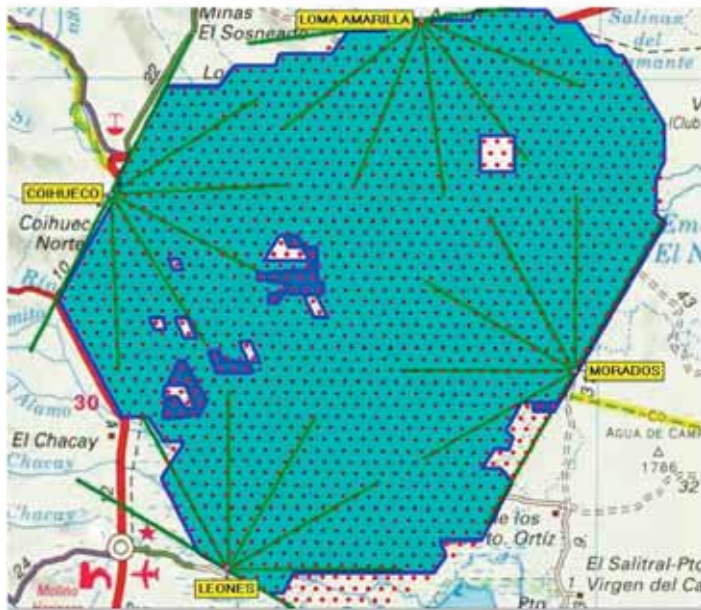


Figura 11. «Array» de superficie del Observatorio Pierre Auger. Los detectores se extienden sobre un área total de 6000 km² (izquierda). Sobre la foto se señalan con flechas algunos de los detectores separados entre sí por una distancia de 1,5 km (derecha).

hadrónicos solo han podido ser probados hasta las máximas energías disponibles en aceleradores, y por lo tanto muchos órdenes de magnitud inferior a las colisiones entre el rayo cósmico y los núcleos atmosféricos. Sin embargo, los telescopios de fluorescencia solo pueden operar durante periodos limitados de tiempo (noches claras y sin Luna). La combinación de ambas técnicas (fig. 13) ha permitido al Observatorio Auger calibrar en energía el detector de superficie usando los sucesos híbridos, es decir, registrados simultáneamente por ambos detectores.

Resultados del Proyecto Auger

Aunque la construcción del Observatorio Sur finalizó oficialmente en noviembre de 2008, se han venido tomando datos desde que los primeros detectores de superficie y el primer telescopio de fluorescencia fueron instalados en el año 2001. A partir del año 2007 se han publicado una serie de resultados relevantes en este campo que vamos a resumir a continuación.

Se ha obtenido el espectro de energía por encima de 10^{18} eV a partir de más de 35000 rayos cósmicos registrados. El error sistemático más importante proviene de

la escala de energía y se estima en alrededor del 22%. Se ha medido con precisión el cambio de pendiente en la región alrededor de 4×10^{18} eV (el llamado tobillo del espectro) probablemente debido a la transición de rayos cósmicos galácticos a extragalácticos. A partir de esta energía el espectro cae con una ley de potencia ($\gamma = 2,55 \pm 0,04$) hasta una energía de $3,98 \times 10^{19}$ eV, a partir de la cual se observa una clara disminución del flujo, perfectamente compatible con el efecto GZK predicho en 1966.

Se ha estudiado la distribución de direcciones de llegada en busca de anisotropías, tanto a pequeña como a gran escala. No se han observado indicios de direcciones privilegiadas alrededor del centro galáctico en oposición al resultado de AGASA. Sin embargo, la búsqueda de correlaciones con un conjunto específico de AGNs llevado a cabo en 2007 dio un resultado positivo que fue publicado en la revista *Science* con gran repercusión en la comunidad científica (más de 160 citas en solo 2 años). En aquel momento se habían registrado 27 rayos cósmicos con energías superiores a 57 EeV que mostraban una clara correlación con los 472 AGNs del catálogo Véron-Cetty/Véron con distancias superiores a 75 Mpc. Esta correlación específica ha disminuido durante



Figura 12. Detector de fluorescencia del Observatorio Pierre Auger. Cada una de las estaciones (izquierda) consta de cuatro telescopios, uno de los cuales se muestra en la figura (derecha).

el último año, no obstante se mantiene de manera inequívoca la evidencia de anisotropía.

Aunque el objetivo del Observatorio es la detección de rayos cósmicos cargados, ambos detectores son también sensibles a rayos γ cósmicos de ultra-alta energía que a su entrada en la atmósfera generan una cascada electromagnética. El resultado de la búsqueda ha sido negativo, pero ha proporcionado límites al flujo de rayos γ de ultra-alta energía notablemente inferiores a los impuestos en experimentos previos. Estos nuevos límites más restrictivos están empezando a descartar algunos modelos *top-down* propuestos para explicar el origen de los rayos cósmicos de ultra-alta energía.

Un parámetro muy importante que hay que medir es la masa de estos rayos cósmicos, o más exactamente, la distribución o espectro de masas. Éste es un ingrediente fundamental junto al espectro de energía para poder interpretar las anisotropías. Cuanto mayor es la masa del núcleo primario y/o menor es su energía más rápidamente se desarrolla la cascada de partículas en la atmósfera. La medida simultánea de la energía del rayo cósmico y la profundidad en la atmósfera a la que la cascada adquiere su máximo desarrollo permite determinar la masa del primario. Este último parámetro se puede medir con el detector de fluorescencia. Los resultados encontrados hasta la fecha parecen indicar una compo-

sición ligera haciéndose más pesada a las más altas energías. Desgraciadamente la medida de la masa se apoya de manera inevitable en las predicciones de los modelos de interacción hadrónica que, como antes comentamos, no son fiables a estas energías.

Muchos más detalles sobre los resultados de la colaboración Auger y las publicaciones correspondientes se pueden encontrar en la página web de la colaboración [4].

CONCLUSIONES

Los primeros intentos para entender la naturaleza de los rayos cósmicos, descubiertos a comienzos del siglo pasado, dieron lugar al nacimiento de la Física de Partículas. Más tarde, cuando los primeros aceleradores permitieron provocar de manera controlada colisiones entre partículas, ambas disciplinas se separaron. En todos estos años la Física de rayos cósmicos ha experimentado notables avances pero aun así son muchos los misterios que quedan por desvelar, en particular, el origen de los rayos cósmicos de energías extremas. Una de las principales dificultades proviene de nuestro limitado conocimiento de las interacciones de los núcleos a tan alta energía.

El gran colisionador de hadrones LHC del CERN ha comenzado a funcionar. Aunque la energía de los proto-

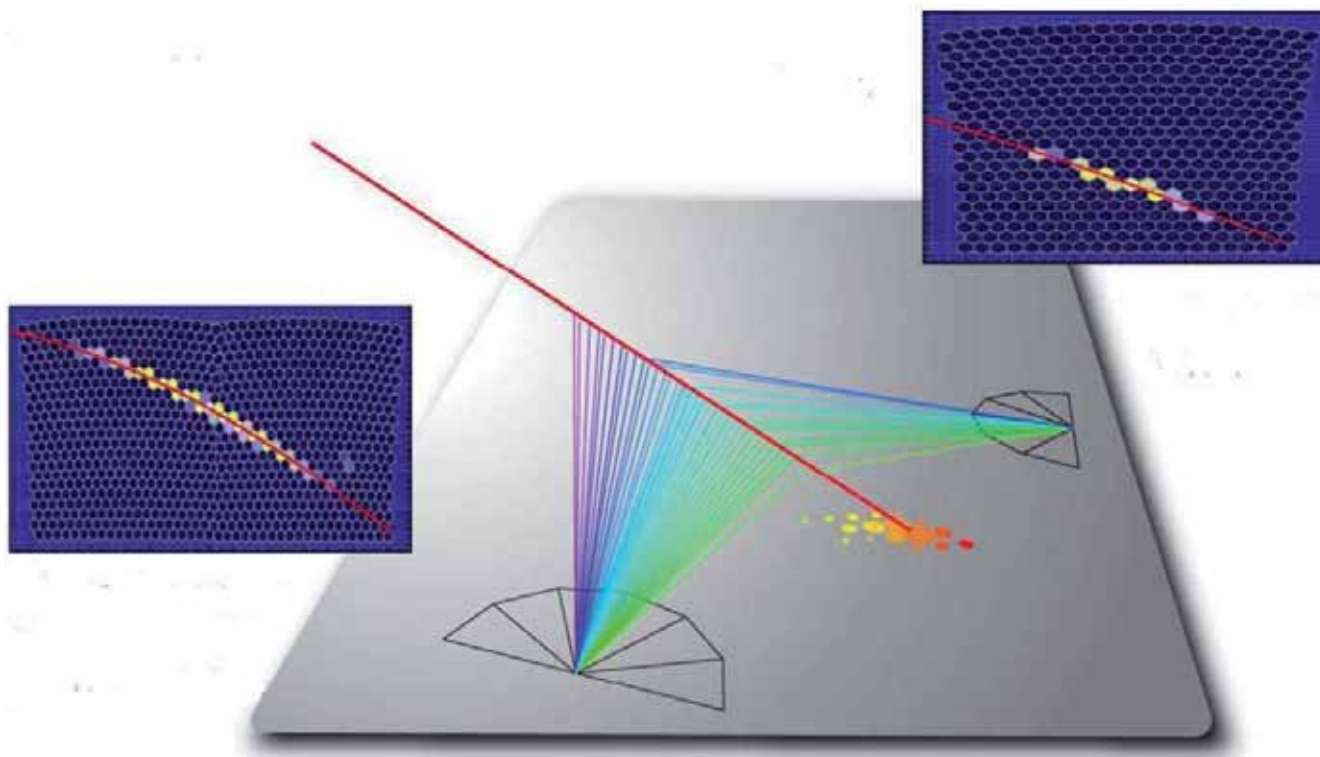


Figura 13. Detección simultánea de un rayo cósmico por ambos detectores. El desarrollo de la cascada en la atmósfera es observada (en este caso particular) por dos telescopios de fluorescencia (visión estereoscópica), mientras que las partículas cargadas de la cascada son registradas por varios detectores del array de superficie.

nes es muy inferior a la de los rayos cósmicos, la energía de la colisión proton-proton en el centro de masas estará a solo un factor ≈ 30 con respecto a colisiones protón-núcleo atmosférico. Con certeza los resultados del LHC permitirán reducir muchas incertidumbres sistemáticas en la interpretación de los datos de rayos cósmicos. Hay que admitir que el inofensivo mosquito de 1 mJ posee capacidades únicas para entender los procesos físicos de alta energía. A diferencia de lo que ocurre con los rayos cósmicos, en el LHC se sabe qué partículas colisionan y qué energía tienen. Además se pueden medir con precisión todos los parámetros de la colisión y los productos resultantes. La interpretación de los datos de rayos cósmicos es mucho más complicada puesto que no sabemos con seguridad cuáles son los núcleos primarios, su energía se mide con poca precisión y, además, solo observamos una pequeñísima fracción de los productos resultantes.

Sin embargo, por muchos años, las partículas más energéticas de la naturaleza seguirán siendo los rayos

cósmicos, al menos una pequeña fracción de ellos. Esperemos que en un futuro próximo sepamos que objetos cósmicos los producen y que procesos físicos están detrás.

BIBLIOGRAFÍA

1. Sekido, Y. and Elliot, H. (editors): *Early history of cosmic ray studies*, Reidel, Dordrecht, 1985.
2. Nagano M. and Watson A. A., *Rev. Mod. Phys.* **72**, 690 (2000).
3. Greisen, K., *Phys. Rev. Lett.*, **16**, 748 (1966); Zatsepin, Z. T., and V. A. Kuz'minZh, *Eksp. Teor. Fiz. Pis'ma Red.*, **4**, 144 (1966).
4. <http://www.auger.org/>

Fernando Arqueros Martínez
Dpto. de Física Atómica, Molecular y Nuclear
Universidad Complutense de Madrid