Rayos Cósmicos: Las Partículas más Energéticas de la Naturaleza

Fernando Arqueros Martinez

Febrero 1994

Aunque se trata de un hecho perfectamente comprobado, seguramente muchas personas se sorprenderían si supieran que constantemente se encuentran sometidas al bombardeo de partículas de muy alta energía. Concretamente, a nivel del mar, cada una de nuestras manos extendidas de forma horizontal es atravesada por una de estas partículas, en promedio, una vez por segundo. Esta radiación es debida a un fenómeno que fué un enigma durante las primeras décadas del siglo XX y cuyo estudio ha tenido consecuencias de gran trascendencia para la Física. Por un lado dió lugar al descubrimiento de nuevas partículas elementales provocando un cambio radical en nuestra concepción de la estructura microscópica de la materia. Pero además está aportando una valiosísima información acerca de la estructura del Universo.

Al comenzar este siglo ya se conocía la existencia de tres tipos de radiactividad: los rayos α, constituidos por núcleos de helio que son frenados en unos pocos centímetros de aire; los rayos β, que son electrones y tienen mayor poder de penetración y, finalmente, los rayos γ que, a diferencia de los anteriores, no son desviados por campos eléctricos ni magnéticos y tienen un gran poder de penetración ya que son necesarios centímetros de plomo para reducir apreciablemente su intensidad.

En aquella época, se medía la radiactividad con ayuda de electroscopios que detectaban la ionización que ésta producía en el aire. Era bien sabido que aún alejados de fuentes radiactivas de laboratorio, estos aparatos detectaban una ligera ionización que fué exclusivamente atribuida a las fuentes radiactivas naturales que se encuentran en la superficie terrestre. De ser esto cierto, la señal de fondo debería disminuir al alejarnos de la superficie. Para comprobar esta hipótesis, Victor Hess realizó en 1912 una serie de experimentos transportando una cámara de ionización en un globo con el que ascendió hasta 5000 metros de altura y, sorprendentemente encontró que la señal de fondo aumentaba con la altitud. 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 Cósmicos*[1].

Durante los siguientes años se trabajó intensamente para averiguar la naturaleza y origen de estos rayos desconocidos. Muchos nombres relevantes de la Física de este siglo participaron en la búsqueda de la explicación de este enigma. Además de los que más adelante se mencionarán en este artículo se pueden citar los de Anderson, Bethe, Bhabha, Blackett, Compton, Euler, Fermi, Heisenberg, Heitler, Landau, Nishina, Ochialini, Perkins, Wilson, etc.. sin olvidarnos del trabajo que el español Arturo Duperier de la Universidad Complutense realizó en el Imperial College en los años cuarenta.

Los primeros experimentos mostraron que esta radiación poseía un extraordi-

[1]Nombre debido a Millikan (1925)

nario poder de penetración por lo que algunos supusieron que debían ser rayos γ aunque mucho más penetrantes que los de origen terrestre. En 1929 el científico ruso Skobeltzyn, empleando una cámara de niebla en la que podía visualizar las trayectorias (trazas) de las partículas cargadas, observó la presencia de partículas de alta energía que identificó como electrones arrancados a la materia por estos *rayos γ cósmicos.* Sin embargo, ese mismo año, Bothe y Kolhörster realizaron un experimento histórico usando dos contadores Geiger[2] entre los que habían interpuesto una gruesa capa de plomo capaz de frenar todos los electrones de alta energía. Empleando por primera vez el *método de coincidencias* observaron que la radiación cósmica producía simultáneamente señal en ambos detectores. Descartada la hipótesis de que se trataba de dos electrones arrancados a la materia por un mismo rayo γ por ser un proceso altamente improbable, quedó demostrado que las partículas que Skobeltzyn había identificado como electrones producidos por la radiación penetrante eran en realidad la propia radiación penetrante de origen cósmico. Se trataba pués de partículas cargadas de diferente naturaleza a todas las conocidas hasta entonces. Experimentos posteriores realizados con cámaras de niebla demostraron la existencia de otros tipos de partículas de muy alta energía en la radiación cósmica entre las que se desubrió el positrón, e^+, (el electrón positivo predicho por Dirac). Se acababa de abrir la veda para la caza de nuevas partículas.

En 1938, P. Auger y sus colegas de la Escuela Normal Superior de París observaron coincidencias entre señales producidas en contadores Geiger que se encontraban separados por distancias de hasta 150 metros. Por entonces ya se sabía que cuando un fotón γ de alta energía atraviesa la materia se puede convertir en un par electrón-positrón. Por otro lado, los electrones de alta energía crean fotones al ser acelerados en el campo eléctrico de los núcleos atómicos. El resultado de la combinación de ambos procesos es lo que se llama una *cascada electrón-fotón* que consiste en un *chaparrón* (*shower* en ingles) de electrones y fotones. El método de coincidencias es idóneo para la detección de cascadas pués las partículas del chaparrón deben llegar simultáneamente ya que viajan todas a una velocidad igual o *casi* igual a la de la luz. El experimento de Auger podía, por tanto, ser entendido suponiendo la formación de cascadas iniciadas por rayos γ, pero para poder explicar su gran extensión era necesario admitir que éstas se habían producido a gran altitud en la atmósfera. Desde entonces a estas cascadas se las conoce como *Extensive Atmospheric Showers* (cascadas atmosféricas extensas). Lo más impresionante fué que los cálculos predecían que algunas de ellas debían de haber sido producidas por rayos γ de 10^{15} eV (TeV) de energía. Para comprender el asombro que este resultado produjo en la comunidad científica basta comparar esta energía con la asociada a otros procesos microscópicos. Por ejemplo, las energías típicas de los electrones en los átomos

[2] Dispositivo inventado por Geiger y Müller en 1928 en la Universidad de Kiel para detectar electrónicamente el paso individualizado de partículas cargadas.

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, la formación de cascadas electrón-fotón no permitía explicar la existencia de la radiación corpuscular extraordinariamente penetrante que se observaba en la superficie terrestre. La solución final al problema vino de la mano de un descubrimiento que fué de vital trascendencia para el desarrollo de la física nuclear. Al final de los años 30 se buscaba con gran interés una partícula que había sido predicha por Yukawa para explicar la interacción nuclear y que debía tener una masa aproximadamente 200 veces la del electrón. Fué entonces bautizada con el nombre de *mesotrón* o *mesón*. El análisis de trazas de rayos cósmicos en cámaras de niebla mostró evidencias de la existencia de una partícula cargada con esta masa. Aunque más tarde se comprobaría que las partículas observadas no eran las buscadas, estos indicios aumentaron el interés en su búsqueda. En los años 40 se desarrollaron las emulsiones nucleares, similares a las placas fotográficas, pero sensibles a las partículas ionizantes. Estas emulsiones presentan frente a la cámara de niebla gaseosa la ventaja de ser un medio mucho más denso y por tanto, la probabilidad de observar interacciones es mucho mayor. En 1947 se demostró empleando esta técnica que existían dos tipos de mesones. Uno que se frenaba rápidamente y que se desintegraba convirtiéndose en otro de masa ligeramente menor pero de mucho mayor poder de penetración. El primero al que se le denominó *meson*-π (actualmente *pión*) es sensible a la interacción nuclear y es la partícula de Yukawa. El segundo, que fué llamado *meson*-μ tiene una naturaleza similar a la del electrón, constituye la parte más penetrante de la radiación cósmica y actualmente se le conoce como *muón*. En los siguientes años se descubrieron muchas otras partículas nuevas entre los rayos cósmicos empleando la técnica de las emulsiones.

El descubrimiento del muón y del pión y el consiguiente avance en el entendimiento de las interacciones nucleares permitió ajustar las piezas del rompecabezas. La radiación observada en la superficie terrestre es debida al constante bombardeo de núcleos atómicos desnudos (sin electrones) a que se encuentra sometida la Tierra. Al penetrar en la atmósfera, cada uno de estos *rayos cósmicos primarios* produce una cascada hasta cierto punto similar a las de electrones y fotones pero en la que, debido a la distinta naturaleza de los procesos que tienen lugar, se crean una gran variedad de partículas elementales (fig. 1). La cascada se inicia cuando el núcleo primario colisiona con un núcleo atmosférico (Nitrógeno u Oxígeno) produciendo una reacción nuclear en la que parte de la energía se transforma en materia, creándose nuevas partículas, sobre todo piones. El núcleo incidente o los fragmentos resultantes después de esta colisión siguen viajando a gran velocidad en dirección al suelo hasta que de nuevo tiene lugar otra reacción nuclear en la que se producen más partículas y así sucesivamente. En ocasiones algunos fragmentos nucleares alcanzan la superficie terrestre. Los piones neutros π^0 creados se desintegran casi instantáneamente, convirtiéndose en dos rayos γ. Los piones cargados $\pi^\pm$ pueden colisionar con otro núcleo atmosférico produciendo nuevas partículas o desintegrarse en un muón y un neutrino. El muón posee una vida media de 2 millonésimas de segundo (2 μs) tras lo cuál se desintegra convirtiéndose en un electrón y dos neutrinos. Al ser la vida del muón tan corta podría pensarse que ninguno puede llegar *vivo* al nivel del suelo. Sin embargo, debido a su alta velocidad (muy próxima a la de la luz) se ven afectados por la dilatación relativista del tiempo y en nuestro sistema de referencia su vida media es mucho mayor. De hecho, en casi todas las cascadas iniciadas por rayos cósmicos, una parte importante de los muones logran alcanzar la superficie terrestre. Son tan penetrantes que muchos de ellos alcanzan profundidades de cientos de metros bajo tierra, pero, al ser partículas cargadas dejan un rastro de ionización fácilmente detectable. Por este motivo fueron las primeras partículas secundarias detectadas. Por otro lado, los neutrinos que se crean en la desintegración de los piones y de los muones, a pesar de ser muy numerosos, poseen una probabilidad de interacción con la materia extremadamente pequeña por lo que pasaron desapercibidos en los experimentos pioneros. Su poder de penetración es tan grande que pueden atravesar completamente la Tierra.

Como hemos visto, la desintegración de los π^0 da lugar a la creación de fotones cada uno de los cuales produce a su vez una cascada electrón-fotón. La suma de todas ellas da lugar a la llamada *componente electromagnética* de la cascada que consiste en un disco de fotones γ, electrones y positrones que se mueve a la velocidad de la luz teniendo como eje la dirección del rayo cósmico primario (fig. 2). A medida que la cascada se acerca al suelo, es decir profundiza en la atmósfera, este disco aumenta su radio debido a las colisiones elásticas de los electrones con los núcleos atmosféricos. Por otro lado, el número de partículas en el disco inicialmente crece hasta llegar a una profundidad en la que alcanza el máximo desarrollo a partir de la cuál las partículas son absorbidas en la atmósfera. Por ejemplo, un protón (núcleo de H) primario de 10^{15} eV produce una nube de partículas que alcanza su plenitud a unos 6000 metros sobre el nivel del mar con aproximadamente un millón de partículas (γ, $e^\pm$), un tercio de las cuales pueden alcanzar el nivel del mar ocupando una extensión de unos cien metros.

Aunque el modelo que empleó Auger para el cálculo de la energía primaria estaba basado en la hipótesis de una cascada puramente electromagnética, el resultado fué básicamente correcto. De hecho el *record* registrado se encuentra en 10^{20} eV. Esto significa que del espacio exterior nos llegan particulas con energías de hasta 16 Julios !. Esta energía es del mismo orden de magnitud que la que posee una pelota de tenis tras un saque pero transportada por una partícula microscópica. Esto no significa que corramos el riesgo de ser dañados por un rayo cósmico, pués incluso en el muy improbable caso de que el núcleo primario llegase al suelo, la fracción de energía depositada en una interacción es muy pequeña. En vuelos espaciales, sin la protección de la atmósfera, es posible estar sometido a la acción directa de los rayos cósmicos. Durante el primer vuelo tripulado a la Luna, en 1969, los astronautas del Apollo 11 comunicaron a Tierra un curioso fenómeno consistente en que al cerrar los ojos observaban ocasionalmente destellos luminosos. Muy pronto se supo que era debido a los núcleos pesados de la radiación cósmica que incidían en la nave. La cantidad de energía depositada por un núcleo individual en la retina de los astronautas era mayor que el mínimo requerido para excitar las células sensibles a la luz.

Durante los años 50 comenzó el desarrollo de los aceleradores que permitieron llevar a cabo una investigación más detallada de las interacciones de las partículas bajo condiciones experimentales controladas. Fué en este punto cuando la física de partículas elementales se separó de la física de rayos cósmicos, concentrando esta última todos sus esfuerzos en la solución a la segunda parte del enigma. ¿De dónde provienen los rayos cósmicos primarios?, ¿cuáles son las fuentes cósmicas que los producen?, ¿bajo qué condiciones pueden las partículas adquirir tan enorme energía?. A pesar del gran esfuerzo realizado por físicos teóricos y experimentales no tenemos todavía una respuesta segura a estas preguntas.

Uno de los primeros objetivos experimentales ha sido la caracterización de la radiación cósmica que llega a la Tierra. La energía de esta radiación varía en muchos órdenes de magnitud ($10^7 - 10^{20}$ eV) y por tanto, es necesario emplear diversos métodos experimentales dependiendo del intervalo de energía en estudio (fig. 2). Para energías inferiores a 10^{15} eV (PeV) es posible la detección directa del núcleo primario. Para ello se transporta en globo o a bordo de satélites los dispositivos de detección que en ocasiones constituyen verdaderos laboratorios con un peso de varias toneladas. Las técnicas empleadas son similares a las de los experimentos de física nuclear y de partículas elementales. Se provoca la interacción del rayo cósmico con un medio material conocido y se estudian las características de los productos resultantes. Uno de los métodos es el de las emulsiones anteriormente mencionado, otros, más sofisticados, reconstruyen las trayectorias de las partículas que se crean en la colisión lo que permite medir la dirección del rayo cósmico primario. Entre los primeros satélites cabe destacar la serie que con el nombre genérico de *Proton* puso en el espacio la Unión Soviética, el primero de los cuáles, *Proton-1*, fué lanzado en Julio de 1965. Entre los experimentos en globo se pueden mencionar los que la colaboración JACEE (EEUU - Japón) lleva realizando desde 1979.

Los primeros datos pusieron de manifiesto que el número de rayos cósmicos primarios es tanto menor cuanto mayor sea la energía de éstos y por tanto, a muy altas energías el ritmo de llegada es tan lento que las técnicas de detección directa resultan inviables. Por ejemplo, para detectar unos mil rayos cósmicos con energías superiores a 1 PeV sobre una superficie de 10 m^2 se necesitaría más de un año.

Se han desarrollado paralelamente una serie de técnicas de detección indirecta basadas en la observación de la cascada atmosférica de partículas empleando detectores instalados sobre la superficie terrestre. Estas técnicas permiten cubrir un amplio margen de energía que va desde 10^{11} a 10^{20} eV. Si la energía del rayo cósmico primario es superior a 10^{14} eV, la componente electromagnética de la cascada puede ser detectada a nivel del suelo. A energías inferiores se puede detectar sin embargo la luz producida por efecto Čerenkov por las partículas de alta energía de la cascada. Los métodos basados en detectores sobre la superficie terrestre pueden ocupar físicamente áreas muy extensas y por tanto tienen una eficiencia mucho mayor que los detectores a bordo de globos o satélites. Sin embargo, tienen como desventaja que la caracterización del primario a partir de los datos de la cascada atmosférica es muy difícil.

Como ya se ha mencionado, el experimento pionero en la detección de los electrones de la cascada atmosférica fué realizado por Auger y, posteriormente, perfeccionado por el grupo de Rossi al final de los años 50. El dispositivo consiste en una disposición bidimensional (*matriz*) de detectores de partículas cargadas. Hoy día se suelen emplear láminas de un plástico *centelleador* con un área típica del orden de 1 m^2. Cuando un electrón de la cascada atraviesa uno de estos plásticos una pequeña parte de su energía se emplea en excitar algunas de sus moléculas que inmediatamente se desexcitan emitiendo un breve *flash* de luz. Esta luz es detectada por un dispositivo fotoeléctrico muy sensible, *fotomultiplicador*, que es capaz de producir una señal eléctrica de muy corta duración. Empleando un dispositivo electrónico suficiéntemente rápido se puede además medir el instante de tiempo en que el electrón atravesó el plástico con una precisión del orden de 10^{-9} s (ns). Estos detectores, por tanto, son capaces de medir la densidad superficial del disco de partículas de la cascada de donde se puede deducir la energía del rayo cósmico primario. Por otro lado, la comparación de los tiempos de llegada de las partículas a los diferentes contadores permite medir la inclinación del disco (ver figuras 2 y 5) obteniendo de este modo la dirección de cada rayo cósmico primario individualmente. A diferencia de los telescopios convencionales, estos dispositivos detectan rayos cósmicos provenientes de todas las direcciones del cielo siendo posteriormente, al analizar los datos, cuando se determina el ángulo con el cada primario llegó a la Tierra. Con este tipo de detectores se consigue una resolución angular típica del orden de 0.5 grados que si bién es muy modesta comparada con la de cualquier telescopio abre la posibilidad de explorar el cielo en busca de las partículas más energéticas que existen en la naturaleza.

Se han construido muchas matrices de centelleadores que se encuentran en la actualidad repartidas por todo el mundo. Se pueden citar como ejemplo la matriz CASA en Utah (EEUU) y el experimento HEGRA (High Energy Gamma Ray Array) que se encuentra instalado a una altitud de 2200 metros sobre el nivel del mar en el Observatorio del Roque de los Muchachos en la isla canaria de La Palma (fig. 3). Estos dispositivos ocupan un área comprendida entre 10^4 y 10^5 m^2 y pueden detectar rayos cósmicos en el rango de 50 TeV a 10 PeV. Por otro lado, han estado funcionando durante muchos años detectores como los de Haverah Park en Inglaterra, Yakutsk en la antigua URRS, Rancho Volcano en Nuevo Méjico, y el detector Sydney en Australia que han detectado rayos cósmicos de hasta $10^{20} eV$. El área que cubren estos detectores es de $\simeq 20$ km^2 excepto el último mencionado cuya superficie es de 200 km^2.

Existe un método alternativo para la detección de la cascada basado en la observación de la luz Čerenkov de las partículas de alta energía que se emite en la misma dirección en que se mueven éstas. Empleando la imagen corpuscular de la luz podemos imaginar a esta radiación como un disco de fotones viajando en la dirección del cósmico primario de forma similar al disco de electrones de la componente electromagnética y, por tanto, también se puede observar la cascada empleando simplemente fotomultiplicadores que detecten directamente el frente de luz Čerenkov. Una ventaja de detectar los fotones Čerenkov en lugar de los electrones es que los primeros vienen concentrados en un disco más fino que los segundos y, por tanto, se puede medir con mayor precisión el instante de llegada a cada detector y así obtener mayor precisión en la medida de la dirección del rayo cósmico primario. En el experimento HEGRA se ha instalado una matriz de fotomultiplicadores que funciona según este principio y que permite tomar datos en combinación con la matriz de centelleadores. En las figuras 4 y 5 se muestra la señal observada por este detector al paso de una cascada iniciada por un rayo cósmico cuya energía debió ser de aproximadamente 400 TeV. La intensidad de luz Čerenkov detectada en cada fotomultiplicador ha permitido localizar la posición del eje de la cascada y estimar la energía del rayo cósmico primario. Además, la medida del instante de llegada de los fotones a cada detector ha permitido reconstruir la dirección en que llegó el rayo cósmico con un error inferior a 0.1 grados.

La radiación Čerenkov de la cascada puede ser también detectada mediante un telescopio reflector. Estos *telescopio Čerenkov* no necesitan espejos de gran precisión pués la resolución angular está limitada de antemano por la dispersión de las particulas en la cascada, sin embargo, para poder tener suficiente sensibilidad es necesario que la superficie recolectora de luz sea muy grande. El *flash* de luz Čerenkov producido por cada rayo cósmico individual dura sólo unos pocos nanosegundos y por tanto, tiene que ser detectado con fotomultiplicadores de respuesta muy rápida. Frente a las matrices de centelleadores, los detectores de radiación Čerenkov tienen la desventaja de que funcionan solo en total oscuridad (noche sin Luna). Por otro lado, a diferencia de las matrices de contadores, el telescopio solo detecta los rayos cósmicos que llegan en la dirección en la que está apuntando. Ultimamente se está extendiendo el empleo combinado de varios telescopios instalados en el mismo observatorio con el fin de detectar la luz simultáneamente en varias posiciones de la cascada. El telescopio Čerenkov más grande del mundo ha sido desde hace muchos años es el que se encuentra en el observatorio de Whipple en Arizona (EEUU) que tiene un diámetro de 10 metros y detecta la luz con una *cámara* formada por 109 fotomultiplicadores. Recientemente este observatorio ha construido otro aún mayor (11 metros) que entrará en funcionamiento próximamente. En el experimento HEGRA se encuentran funcionando dos telescopios Čerenkov de un total de cinco que serán instalados en un corto plazo de tiempo.

Al atravesar la atmósfera, las partículas de la cascada producen la excitación e ionización de las moléculas de aire. Al desexcitarse emiten luz de fluorescencia que a diferencia de la radiación Čerenkov es emitida en todas direcciones. Si nuestros ojos tuvieran suficiente sensibilidad podríamos ver la entrada de los rayos cósmicos en la atmósfera de forma similar a la de un meteorito, aunque a mucha mayor velocidad. Existe un detector instalado en Utha llamado *Fly's Eye* consistente en una disposición de 880 fotomultiplicadores que observan cada uno una dirección del cielo. Este *Ojo de Mosca* permite detectar la llegada de rayos cósmicos de muy alta energía ($> 10^{17}$ eV) mediante la observación de toda la cascada. Su eficiencia es muy alta ya que puede cubrir un volumen de atmósfera de muchos kilómetros cúbicos.

El desarrollo de estas técnicas experimentales ha permitido llevar a cabo un estudio sistemático de las propiedades de los rayos cósmicos que llegan a la Tierra. En primer lugar, se ha observado que la mayor parte son núcleos atómicos. Su *composición química*, es decir, las abundancias relativas de los distintos elementos, es muy similar a la del sistema solar, de forma que la mayor parte de los rayos cósmicos son protones (núcleos de H) y partículas α (núcleos de He) encontrándose también núcleos de número atómico intermedio entre los que destacan los de C, N y O y elementos pesados entre los que predominan los núcleos de Fe. Se ha detectado además la presencia de una pequeña proporción de electrones y de fotones γ. También se ha puesto de manifiesto que el flujo de rayos cósmicos disminuye muy rapidamente con la energía E, siguiendo una ley $E^{-\gamma}$. Hasta energías de 1 PeV, γ tiene un valor de 2.7 aproximadamente haciéndose esta disminución más brusca a energías superiores ($\gamma \simeq 3$). Finalmente, los pocos rayos cósmicos observados con energías comprendidas entre 10^{19} y 10^{20} eV parecen indicar que el espectro es más plano en esta zona, es decir, que esta brusca disminución cesa.

Se ha estudiado tambien la dependencia del flujo de rayos cósmicos con la dirección de llegada a la Tierra observándose que existe básicamente isotropía a excepción de ciertas anomalías que afectan solo a los rayos cósmicos de baja energía y que pueden ser explicadas como un efecto del campo magnético terrestre. Esto significa que los rayos cósmicos nos llegan con igual probabilidad desde todas las direcciones del espacio lo que puede explicarse teniendo en cuenta que son partículas cargadas y por tanto, al moverse en el seno de los diversos campos magnéticos cósmicos, están sometidos constantemente a fuerzas que los desvían de sus trayectorias. La estructura de estos campos es altamente irregular y como consecuencia se pierde toda la información acerca de la dirección de las fuentes cósmicas que las emitieron. Por otro lado, estos campos magnéticos pueden mantener confinados a los rayos cósmicos, de forma que para un campo y una región del espacio dados existe un rango de energías por debajo del cual ningún núcleo puede escapar. Este límite es tanto más alto cuanto mayor sea la intensidad del campo magnético y mayor el volumen ocupado. En realidad no se trata de un límite estricto de energía sino que la probabilidad de escapar es tanto mayor cuanto mayor sea la energía del núcleo. Esta propiedad permite explicar que el flujo de rayos cósmicos sea fuertemente decreciente con la energía.

Los cálculos de esta energía límite han permitido rechazar o aceptar distintas hipótesis acerca del origen de los rayos cósmicos. Los primeros modelos que suponían que todos los rayos cósmicos provenían del sol fueron pronto descartados porque el campo magnético solar no puede confinar rayos cósmicos tan energéticos como los que se han detectado y por tanto estos escaparían del sistema solar sin alcanzar la isotropía que observamos desde la Tierra. No obstante, una parte importante de los de baja energía son efectivamente de origen solar. El campo magnético de nuestra galaxia por el contrario puede confinar partículas de muy alta energía y en un principio fué unanimamente aceptado el origen galáctico de los rayos cósmicos. Sin embargo cuando en 1962 J. Linsley y L. Scarsi observaron por primera vez en la matriz de detectores de Rancho Volcano una cascada debida a un rayo cósmico de energía 10^{20} eV, este modelo se tambaleó pués esta energía es muy superior al *límite galáctico*. En los siguientes años se han registrado un importante número de rayos cósmicos con energías comprendidas entre 10^{18} y 10^{20} eV. Estas observaciones han dado fuerza a la hipótesis del origen extragaláctico de, al menos, una parte de los rayos cósmicos.

No obstante, existen varios argumentos que ponen en duda la hipótesis del origen extragaláctico de los rayos cósmicos. Un año después del descubrimiento en 1965 de la radiación electromagnética de fondo que ocupa todo el espacio K. Greisen y G. T. Zatsepin demostraron que los rayos cósmicos con energías por encima de $6 \cdot 10^{19}$ eV tienen una probabilidad muy alta de destruirse al colisionar con los fotones de la radiación de fondo en su largo camino por el espacio intergaláctico y por tanto, aunque se crearan rayos cósmicos en otras galaxias, no llegarían a la Tierra. Otro argumento está relacionado con la composición química, ya que la energía máxima a la que una partícula puede estar confinada en un campo magnético depende tambien de su carga. Para los cálculos de confinamiento se ha supuesto que estamos tratando con protones, pués, al menos a bajas energías, son la componente predominante de los rayos cósmicos. Sin embargo, para un núcleo de hierro que tiene una carga igual a 26 veces la del proton, la energía límite para su confinamiento es 26 veces superior. Por ejemplo, si todos los rayos cósmicos de máxima energía fueran núcleos de hierro, no sería necesario recurrir a la hipótesis extragaláctica. De hecho, aunque todavía no tenemos datos suficientes acerca de la composición química a energías por encima de 1 PeV se ha demostrado que existe un enriquecimiento en núcleos pesados. Finalmente, teniendo en cuenta que el campo magnético en el medio intergaláctico es muy débil, los rayos cósmicos de máxima energía deberían mantener su trayectoria hasta la llegada a la Tierra y por tanto, las direciones de llegada deberían indicar hacia donde estan situadas las fuentes. No existen, sin embargo, evidencias experimentales claras de direcciones privilegiadas aunque esto puede ser debido a que el número de rayos cósmicos detectados con tan alta energía no es todavía suficiente.

¿Que tipo de fuentes cósmicas pueden emitir partículas de tan alta energía?. Los candidatos con más posibilidades dentro de nuestra galaxia son las explosiones de supernovas, los pulsars y el núcleo de la galaxia que podría contener un agujero negro. Las supernovas se manifiestan como explosiones catastróficas que marcan el final de la vida de una estrella masiva creándose elementos químicos pesados y núcleos radiactivos. Poco después de la explosión, el núcleo de la estrella se colapsa pudiendo dar lugar a un objeto extraordinariamente compacto[3] llamado *estrella de neutrones*. También se especula con la posibilidad de que en algunos casos la densidad de este objeto sea tan grande que la propia atracción gravitatoria sobre los fotones impida la emisión de luz; es decir lo que se conoce como un *agujero negro*. La contracción de la estrella produce, debido al principio de conservación del momento angular, un aumento en su velocidad de rotación tan grande que en ocasiones la estrella da una vuelta completa en solo centésimas de segundo. Las partículas cargadas atrapadas en su campo magnético alcanzan velocidades próximas a la de la luz originando un cono de radiación que giran con la estrella. La radiación es observada desde la Tierra solo cuando el haz incide sobre ella y por tanto aparece en forma pulsada del mismo modo que observamos desde el mar la luz emitida por un faro. Por este motivo a estos objetos se les llama *pulsars*. Por otro lado, a la vez que se produce la contracción de la estrella, las capas más externas de ésta son emitidas hacia el exterior creándose una tremenda onda de choque que emite radiación en todo el espectro electromagnético. Existen tambien posibles fuentes fuera de nuestra galaxia que tienen capacidad para producir rayos cósmicos como, por ejemplo, los *quasars*[4] que son los objetos más energéticos que se conocen en el Universo y que se encuentran a distancias de miles de millones de años luz. Por otro lado existen galaxias que poseen núcleos activos en donde se desarrollan procesos de muy alta energía algunos de los cuales se manifiestan por una fuerte emisión de ondas de radio

[3] Un centímetro cúbico de materia de este objeto pesa del orden de cien millones de toneladas

[4] *quasi-stellar radio sources*

(*radiogalaxias*).

En todos estos objetos mencionados tienen lugar procesos que podrían dar lugar a la emisión de núcleos atómicos, electrones y fotones, sin embargo, no es sencillo entender el procedimiento por el que los rayos cósmicos pueden llegar a adquirir tan alta energía como la que ha sido medida con nuestros detectores en la Tierra. Un posible mecanismo consiste en lo siguiente: rayos cósmicos ya existentes que viajan por el espacio pueden alcanzar uno de estos objetos, principalmente la onda de choque de una supernova o un núcleo galáctico y ser acelerados por su campo magnético. A lo largo de su existencia, el rayo cósmico puede ganar energía muchas veces llegando a adquirir valores enormes. Es simplemente una cuestion de probabilidad estadística. Naturalmente existe también la posibilidad de que el núcleo sea acelerado de forma directa de una sola vez adquiriendo gran energía. Esto podría ocurrir en sistemas como los pulsars cuyos campos magnéticos en rotación inducen una potentísima fuerza electromotriz.

Un importante objetivo experimental es la localización de las fuentes específicas que emiten los rayos cósmicos. Estas fuentes no pueden ser detectadas midiendo la dirección de los núcleos cargados pués como se ha mencionado, los campos magnéticos cósmicos les desvían de su dirección de emisión. No obstante, desde hace tiempo se sabe que entre la radiación cósmica existe una pequeñísima fracción de fotones γ que al ser partículas neutras no son desviados por los campos magnéticos y por tanto, mantienen la misma dirección con la que salieron de la fuente que las emitió. Para la detección y medida de la dirección de los fotones γ cósmicos se emplean técnicas similares a las usadas con los núcleos cargados. La dificultad más importante de esta *Astronomía de Rayos* γ es debida al intenso flujo isótropo de rayos cósmicos cargados que oculta la presencia de los fotones. Intentar detectar las fuentes de rayos γ en estas condiciones es similar a pretender ver las estrellas con la luz del día y por ello es de vital importancia emplear técnicas que permitan eliminar este fondo de rayos cósmicos.

Para energías inferiores a algunos GeV el flujo de fotones de las fuentes observadas es suficientemente intenso para poder llevar a cabo la detección directa en laboratorios a bordo de satélites. Uno de los métodos empleados para eliminar el fondo de rayos cósmicos en este rango de energías consiste en rodear el experimento con un detector que sea sensible al paso de partículas cargadas pero no de fotones γ. Solo se tienen en cuenta los sucesos que se observan en ausencia (*anticoincidencia*) de señal de este detector externo que de este modo funciona como un blindaje activo. Los experimentos SAS II y COSB que estuvieron en operación durante los años 70 y el comienzo de los 80 nos han proporcionado una primera imagen del Universo con fotones de energía superior a 50 MeV. Se han detectado fuentes puntuales galácticas entre las que destacan por su intensidad los pulsars del Cangrejo y de Vela que se supone son los restos de explosiones de supernovas, un misterioso objeto llamado Geminga que radia la mayor parte de su energía en forma de rayos γ así como una fuente extragaláctica, el quasar 3C273. También se ha observado la emisión difusa de rayos γ del disco galáctico. Este último efecto parece ser en parte debido a la desintegración de los π^0 producidos en las colisiones de los protones cósmicos con el hidrógeno interestelar. En Abril de 1991 fué lanzado al espacio el observatorio COMPTON provisto del equipo de detección de rayos γ más avanzado que existe en la actualidad. Los datos enviados a Tierra por este satélite han confirmado la existencia de las fuentes detectadas en las antiguas observaciones pero además ha permitido descubrir muchos otros objetos emisores de rayos γ entre los que destaca el quasar 3C279 que, a pesar de encontrarse a una distancia de la Tierra de aproximadamente 5000 millones de años luz, es una de las fuentes más luminosas en el rango de energías del GeV.

El flujo de rayos γ a energías superiores a 100 GeV es demasiado bajo para ser detectado de forma directa en los laboratorios espaciales. Sin embargo, cuando un rayo γ cósmico penetra en la atmósfera terrestre provoca una cascada electrón-fotón que si posee suficiente energía puede ser detectada por telescopios Čerenkov e incluso por matrices de centelleadores. Las cascadas producidas por rayos γ tienen características diferentes a las iniciadas por núcleos pués los procesos físicos que las producen son diferentes. Sin embargo, los detectores en el suelo sólo dan una información muy limitada de las propiedades de la cascadas y la diferenciación resulta muy dificil en la práctica. Recientemente se está dedicando un gran esfuerzo en la búsqueda de métodos que permitan reducir el fondo de rayos cósmicos cargados. Para ello, empleando potentes computadoras, se simula con todo detalle la formación de cascadas atmosféricas iniciada por rayos γ y por núcleos buscando características diferenciadoras que puedan ser observadas por los dispositivios experimentales.

En la región de energía alrededor del TeV, en donde se emplean telescopios Čerenkov, se ha desarrollado una técnica basada en el análisis de la imagen que forma la luz Čerenkov en el plano focal que está permitiendo eliminar el fondo de rayos cósmicos cargados de forma muy eficiente. Empleando esta técnica se ha detectado la emisión continua de radiación γ de la nebulosa del Cangrejo a energías superiores a 300 GeV. La emisión de radiación γ de esta fuente puede ser explicada admitiendo que los electrones son intensamente acelerados en la onda de choque hasta energías muy altas ($10^{14} - 10^{16}$ eV). La emisión de rayos γ de energía inferior a 5 GeV es atribuida a la curvatura de las trayectorias de estos electrones en el campo magnético de la nebulosa (radiación sincrotrón). La emisión de radiación por encima de 5 GeV puede explicarse si tenemos en cuenta que estos electrones pueden ceder parte de su energía a fotones poco energéticos (efecto Compton inverso). Un sorprendente descubrimiento llevado a cabo también por el telescopio del observatorio de Whipple ha sido la observación del núcleo galáctico activo Mrk 421, fuente extragaláctica de rayos γ detectada por el observatorio COMPTON y que parece emitir con gran intensidad a energías cercanas al TeV.

Las matrices de centelleadores permiten medir la dirección de llegada del rayo cósmico y por tanto son aptas para la búsqueda de fuentes emisoras de rayos γ. Al igual que para los rayos cósmicos cargados, la energía mínima de detección depende de las características de cada matriz siendo habitualmente superior o del orden a los 50 TeV. En este rango, sin embargo, la búsqueda de fuentes no ha dado todavía resultados claros. Para la eliminación del fondo de rayos cósmicos se ha empleado habitualmente un método basado en la medida del contenido de muones de la cascada con detectores apropiados. Para la misma energía incidente, el número de muones producido en una cascada iniciada por un fotón debe ser unas treinta veces inferior al producido en una cascada de un protón y aún menor respecto a cascadas iniciadas por núcleos pesados.

Una de las observaciones más significativas ha sido la llevada a cabo por el grupo de la Universidad de Kiel (publicado en 1983). Empleando una matriz de centelleadores instalados a nivel del mar observaron un exceso de rayos cósmicos en la dirección de Cisne X-3. Esto suponía el hallazgo de una fuente capaz de emitir fotones con energías superiores a 1 PeV. A partir de las observaciones astronómicas se sabe que Cisne X-3 es un sistema binario formado por una estrella normal a cuyo alrededor gira un objeto muy denso (probablemente una estrella de neutrones) con un periodo de 4.8 horas. El hecho que resultó más sorprendente, sin embargo, fué que las cascadas que provenían de Cisne X-3 contenían, en contra de lo esperado, una cantidad de muones muy similar a las de las cascadas detectadas en otras direcciones debidas a los núcleos cósmicos. Este hallazgo movió a muchos físicos teóricos a especular sobre la existencia de una nueva partícula emitida por esta estrella. Se trataría de una partícula neutra, pués mantiene la direccionalidad, estable, pués llega sin desintegrarse desde una fuente que está a unos 25000 años luz y de masa muy pequeña o nula ya que teniendo en cuenta que llega a la vez que la luz, debe viajar a una velocidad igual o muy próxima a la de ésta. Si bien ninguna de las hipótesis ha cristalizado, la sospecha de que estas partículas podrían no ser fotones ha movido a muchos científicos a utilizar para este rango de energía el término *búsqueda de partículas neutras* en vez de astronomía de rayos γ. Desgraciadamente, tanto ésta como otras observaciones de fuentes puntuales en la region del PeV no han sido repetitivas.

En resumen, se han detectado numerosas fuentes que emiten rayos γ con energías comprendidas entre el MeV y el GeV, pero en la región del TeV las observaciones son muy escasas todavía por lo que se están construyendo actualmente varios telescopios Čerenkov de grandes dimensiones que permitan la detección de otras fuentes en esta zona de energía. Por otro lado, el flujo de fotones γ procedente de la nebulosa del Cangrejo observado con los telescopios Čerenkov es suficientemente intenso para que existan fundadas esperanzas de que pueda ser observado con matrices de centelleadores o de detectores abiertos de luz Čerenkov instalados a altitud de montaña.

Para resolver el enigma del origen galáctico o extragaláctico de los rayos cósmicos de máxima energía es necesario disponer de un mayor número de detecciones. Actualmente, se están construyendo nuevas matrices de centelleadores entre las que destaca el proyecto AGASA que ocupa una superficie de 100 km^2 y el detector EAS-1000, en la República de Kazajstan (antigua Unión Soviética) que contará con un área de casi 1000 km^2. Con este mismo fin se está desarrollando un nuevo proyecto basado en la técnica *Fly's Eye* que se conoce como experimento HIRES con el que se prevé observar casi 300 sucesos anuales con energía superior a 10^{20} eV reconstruyendo la dirección de llegada con un error del orden de 0.3 grados. Por otro lado, existen motivos para pensar que el cambio de pendiente en el espectro de energía de los rayos cósmicos que tiene lugar aproximadamente a 1 PeV está intimamente relacionado con una cambio en la composición química a esa energía. Por este motivo, se está realizando un gran esfuerzo para acumular datos en esta región de energía tanto con métodos directos (experimento JACEE) como con métodos indirectos. Entre estos últimos podemos citar el experimento KASKADE que proximamente entrará en funcionamiento en Karlshrue (Alemania) y que cuenta con la instrumentación necesaria para poder analizar la componente hadrónica de las cascadas con gran detalle lo que permitirá llevar a cabo estudios de composición química en esta región de energía.

Como dijimos al principio, los comienzos de la física de rayos cósmicos estuvieron muy ligados a los de la física de partículas elementales. Hoy día existen de nuevo motivos para trabajar en común. Por un lado, la radiación cósmica contiene partículas con energías muy superiores a las que se pueden conseguir con aceleradores construidos por el hombre. Los datos experimentales acerca del desarrollo de las cascadas en la atmósfera nos podrían proporcionar una información valiosísima sobre las interacciones que tienen lugar a estas energías. Pero, por otro lado, para conseguir una caracterización completa de la radiación cósmica a partir de la detección de las cascadas atmosféricas es necesario un conocimiento preciso de las propiedades de la interacción de las partículas elementales a estas altas energías. El procedimiento habitual consiste en suponer que podemos extrapolar las leyes establecidas a baja energía y que han sido comprobadas en los aceleradores. Esta hipótesis no tiene porque ser cierta y así, por ejemplo, el problema de los muones de las cascadas de Cisne X-3 podría ser explicado suponiendo que a esas energías las cascadas de fotones producen más muones que las calculadas a partir de las leyes conocidas. En principio, a partir de los datos experimentales de cascadas atmosféricas se podrían deducir propiedades de las interacciones de la partículas a estas energías. Desgraciadamente, nuestro conocimiento del espectro y de la composición química de estos rayos cósmicos es todavía muy primitivo. Esto significa que cualquier anomalía encontrada puede ser debida al descubrimiento de una nueva propiedad de las partículas o bien a que nuestra hipótesis acerca de las características de los rayos cósmicos que llegan a la Tierra es erróneo. Parece, por tanto, que al igual que ocurrió al comienzo de este siglo, el avance en el conocimiento de la estructura del Universo (lo muy grande) estará en el futuro íntimamente relacionado con el avance en la física de partículas elementales (lo muy pequeño).

Pies de figura

Figura 1.- Cuando un rayo cósmico primario entra en la atmósfera se produce una cascada de partículas elementales muchas de las cuales pueden alcanzar la superficie terrestre.

Figura 2.- Los rayos cósmicos primarios pueden ser detectados de forma directa en globos y satélites o de forma indirecta con dispositivos en el suelo que detectan la cascada de partículas. A diferencia de los fotones γ, los núcleos cargados no mantienen su direccionalidad excepto los que por tener muy alta energía no deberían ser desviados por el campo magnético galáctico.

Figura 3.- Matriz de contadores del experimento HEGRA instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos en la isla de La Palma (Instituto de Astrofísica de Canarias). Foto tomada en 1991.

Figura 4.- Cascada de partículas detectada por la matriz de detectores de luz Čerenkov del experimento HEGRA. A partir de la intensidad registrada en cada contador se ha determinado la posición del eje de la cascada (punto negro) y la energía del rayo cósmico primario que fué de aproximadamente 400 TeV.

Figura 5.- A partir del instante de tiempo (ns) en que cada contador detectó la llegada de la cascada de la figura 4, se ha determinado la dirección con la que el rayo cósmico primario incidió en la atmósfera con un error inferior a 0.1 grados. Las lineas rectas unen las posiciones para las que el frente llegó al mismo tiempo.

Figura 6.- Los rayos cósmicos que llegan a la Tierra poseen un amplio espectro de energía. Como se muestra en este esquema, tanto sus propiedades como los métodos de detección dependen de la energía primaria.

Figura 7.- El observatorio COMPTON puesto en órbita en Abril de 1991 detecta rayos γ del espacio con energías de hasta Gigaelectronvoltios.

Figura 8.- La nebulosa del Cangrejo y su pulsar que son los restos de la explosión de una supernova que fué observada por astrónomos chinos y japoneses hace 940 años, emiten rayos γ de alta energía. Esta imagen, correspondiente al rango de energía del Megaelectronvoltio, ha sido obtenida por el observatorio COMPTON.

Figura 9.- Telescopio de radiación Čerenkov del experimento HEGRA que ha permitido detectar la emisión de radiación γ de la nebulosa del Cangrejo con energía superior al Teraelectronvoltio.