

# Una lluvia que llega del cosmos



Desde diversos rincones del cosmos viajan partículas energéticas que arriban a la Tierra e incluso atraviesan su superficie. A través del análisis de ellas podemos adquirir valiosa información de lugares recónditos del Universo.

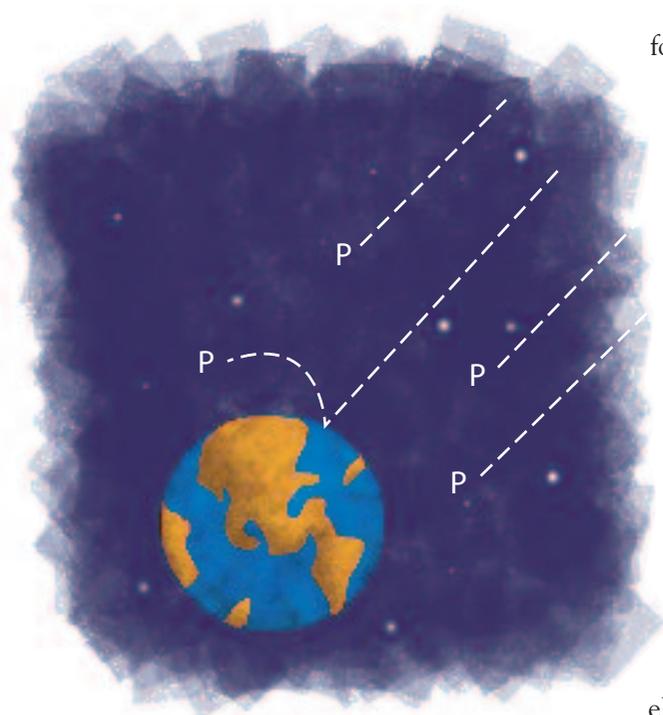
José Fco. Valdés Galicia y Rogelio A. Caballero-López

Aunque quienes habitamos en la superficie de nuestro planeta no lo notamos, desde todas direcciones llega a la Tierra una pertinaz lluvia de partículas, procedente de lugares lejanos en el cosmos. A esta lluvia se le conoce como *rayos cósmicos*. Son partículas energéticas que viajan por el espacio; algunas de ellas pueden atravesar la atmósfera de la Tierra y llegar hasta sitios profundos debajo de la superficie. Su estudio es de gran relevancia científica, pues son la única información material que tenemos del Universo más allá de la Tierra. Su composición química contiene claves importantes para dilucidar misterios astrofísicos no resueltos; sus energías cubren un amplio intervalo que va desde las energías de amarre en los núcleos atómicos hasta aquellas que podemos percibir en nuestra vida cotidiana. Los rayos cósmicos menos energéticos son afectados por la presencia del Sol y la cavidad dominada por el astro rey (la heliosfera), por ello nos traen información de las condiciones de esta región. Los más energéticos plantean retos como el de imaginar los aceleradores cósmicos que pueden ser capaces de llevar partículas subatómicas hasta energías equivalentes a las que poseen objetos

con dimensiones humanas, energías imposibles de reproducir en nuestro planeta.

Estas partículas cósmicas fueron descubiertas debido a la ionización que provocan al atravesar la atmósfera terrestre, la cual afectaba los electrómetros usados en los laboratorios a principios del siglo pasado. La mayoría de los científicos que se toparon con el fenómeno trataron de atribuirlo a causas terrestres, y realizaron muchos experimentos para demostrarlo. Pero en 1912 Victor Hess, científico austriaco, realizó una serie de ascensiones en globos aerostáticos y observó que la ionización era mayor conforme el globo ascendía, independientemente del clima y de la hora en que se efectuaran los vuelos. La conclusión de Hess no podía ser otra que establecer el origen extraterrestre de esta radiación.

Durante varias décadas se diseñaron ingeniosos experimentos que se realizaron en el

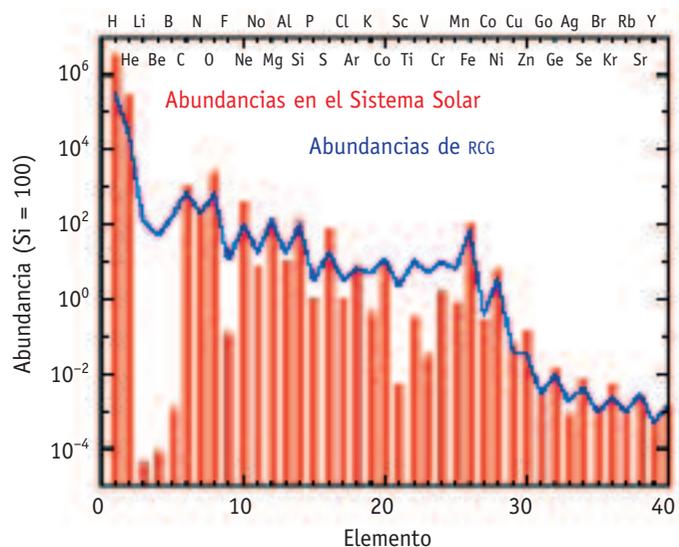


fondo marino, en el interior de minas, en las más altas montañas terrestres y a bordo de aparatos en vuelo. Con el tiempo los científicos se dieron cuenta de que la radiación cósmica llega a la Tierra uniformemente desde todas direcciones, y que su poder de penetración es mucho mayor que el de cualquier otra radiación conocida.

### LOS RAYOS CÓSMICOS EN LA ATMÓSFERA TERRESTRE

Estas partículas energéticas que llegan a la alta atmósfera son principalmente protones (núcleos de hidrógeno), aunque también existen núcleos de elementos más pesados. Se han detectado núcleos de helio (el elemento que sigue al hidrógeno en la tabla periódica) y de todos los elementos subsiguientes, hasta el uranio. En la Figura 1 se hace una comparación entre las abundancias relativas de los elementos en los rayos cósmicos y los del Sistema Solar. Las coincidencias son admirables. Hay sin embargo diferencias notables; la más importante se halla en los elementos litio, berilio y boro. Existe alrededor de cien mil veces más litio, berilio y boro en los rayos cósmicos que en el Sistema Solar. Esto se debe a que las partículas energéticas más pesadas chocan con las del medio interestelar, fragmentándose en la colisión. Con ello se forman núcleos de elementos más ligeros, entre los que resultan favorecidos el litio, el berilio y el boro.

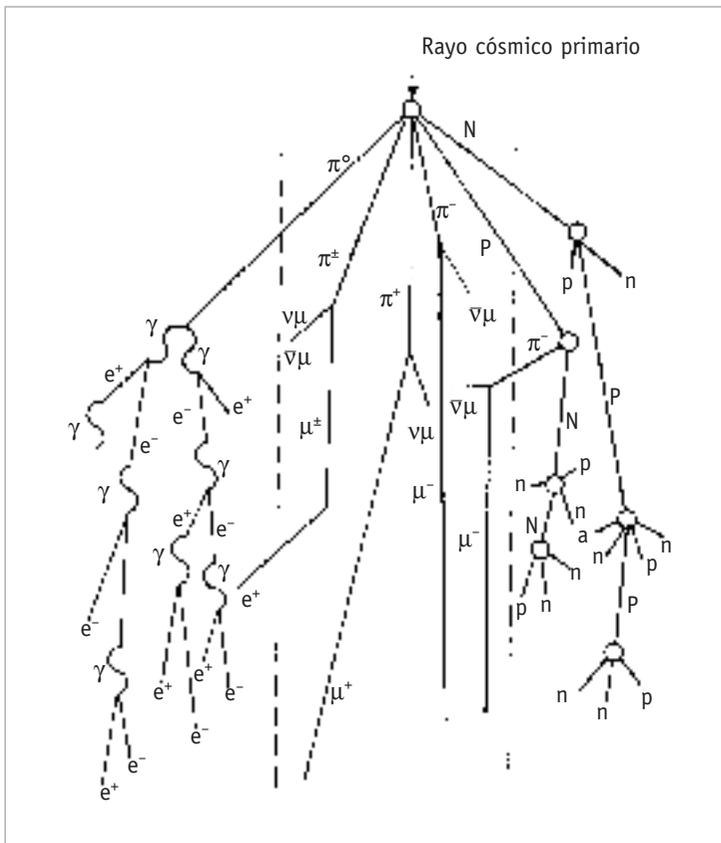
Al llegar al dominio terrestre, los rayos cósmicos van penetrando en una atmósfera cada vez más densa. Alrededor de los 20 kilómetros de altura, las colisiones nucleares son inevita-



**Figura 1.** Comparación de las abundancias de los distintos elementos en el Sistema Solar y en los rayos cósmicos.

bles. Los protones y núcleos que viajan a gran velocidad, fragmentan los núcleos atmosféricos y les imparten una porción sustancial de su energía original. Éstos a su vez son capaces de producir nuevas colisiones nucleares, repitiéndose el proceso por varias generaciones. La desintegración de los núcleos provoca la aparición de partículas subatómicas como piones y muones, que por ser inestables se desintegran en fotones, electrones, positrones y neutrinos. A este cúmulo de partículas que se multiplica mientras desciende rápidamente se le conoce como *chubasco atmosférico* (Figura 2). Las partículas secundarias pueden ser observadas en la superficie terrestre con detectores diseñados especialmente para el propósito.

El número de partículas secundarias que contiene y el área que cubre un chubasco atmosférico al llegar al nivel de tierra depende de la energía de la partícula primaria que lo produjo. Así, partículas primarias con energías entre 500 y 20 mil megaelectrón volts (millones de electrón volts; un electrón volt es la energía que adquiere un electrón en un metro de recorrido al someterse a una diferencia de potencial de un volt) producirán decenas de miles de partículas secundarias que



**Figura 2.** Diagrama esquemático de un chubasco atmosférico donde aparecen nucleones (N), protones (p), neutrones (n), piones ( $\pi$ ), muones ( $\mu$ ), neutrinos ( $\nu$ ), fotones ( $\gamma$ ), electrones y positrones ( $e^{\pm}$ ).

cubren un área de unos cuantos metros cuadrados al llegar a tierra. Los chubascos producidos por partículas en el intervalo energético mencionado pueden ser contenidos totalmente dentro de un solo detector. El diseño actual más común se conoce como *monitor de neutrones*. Existe una red mundial de monitores de neutrones, uno de los cuales opera en Ciudad Universitaria, Distrito Federal. Para registrar chubascos producidos por partículas con energías mayores, son necesarios conjuntos de detectores que se conocen como *arreglos de chubascos*.

La investigación mundial de los efectos del campo geomagnético sobre los rayos cósmicos tuvo entre sus líderes al mexicano Manuel Sandoval Vallarta

## EL EFECTO DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO

Las partículas primarias cuyas energías les permiten ser detectadas por los monitores de neutrones se ven afectadas por la presencia del campo magnético terrestre. Una partícula cargada viajando a través de un campo magnético es obligada a seguir una trayectoria espiral. La espiral será más cerrada para partículas de menor energía; si la energía de la partícula crece, la espiral se abre. Mientras más intenso sea un campo magnético y su dominio se extienda sobre un espacio amplio, su capacidad para desviar abarcará a partículas de energías mayores. El campo geomagnético (véase el artículo “Corazas magnéticas” en este número de *Ciencia*) puede desviar apreciablemente partículas con energías de hasta unos 100 mil megaelectrón volts (o 100 gigaelectrón volts). Cuando la energía de la partícula primaria es de sólo unos cuantos gigaelectrón volts, la trayectoria espiral a la que le obliga el campo geomagnético es tan cerrada que la hace caer, atrapada por las líneas de campo que pertenecen a las regiones polares.

Para llegar a la zona ecuatorial es necesario que la trayectoria espiral sea lo suficientemente abierta; sólo partículas de unos 15 gigaelectrón volts logran alcanzar regiones ecuatoriales. A las regiones polares llega radiación cósmica de prácticamente todas las energías, pero a medida que se descienda hacia el ecuador las partículas de energías más bajas estarán ausentes. Como consecuencia, para cada punto en la superficie terrestre existe una energía mínima que debe poseer la partícula primaria para poder arribar. A esta energía se le llama *energía umbral* o *umbral geomagnético*. Debido a la existencia del umbral geomagnético, la intensidad de los rayos cósmicos es máxima en las zonas polares y desciende hacia el ecuador geomagnético. La investigación mundial de los efectos del campo geomagnético sobre los rayos cósmicos tuvo entre sus líderes al mexicano Manuel Sandoval Vallarta, y posteriormente al grupo formado en el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

En las regiones de alta latitud geomagnética, donde el umbral geomagnético es muy bajo, la energía mínima de detección de un monitor de neutrones está determinada por la masa de atmósfera que tienen que atravesar las partículas secundarias antes de llegar al monitor. La energía mínima de un rayo cósmico primario que puede generar un chubasco cuyas partículas secundarias llegan a tierra es de unos 500 megaelectrón volts. En latitudes medias y bajas, la energía mínima está determinada

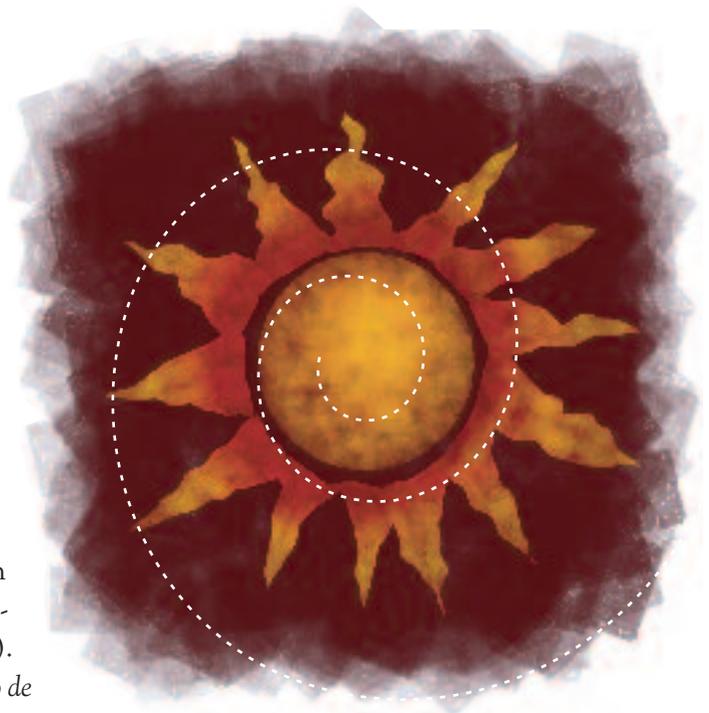
por el umbral geomagnético. Si el monitor se ubica a grandes alturas sobre el nivel del mar, el número de cuentas que registre será mayor, debido a que la absorción de las partículas secundarias por parte de la atmósfera es menor.

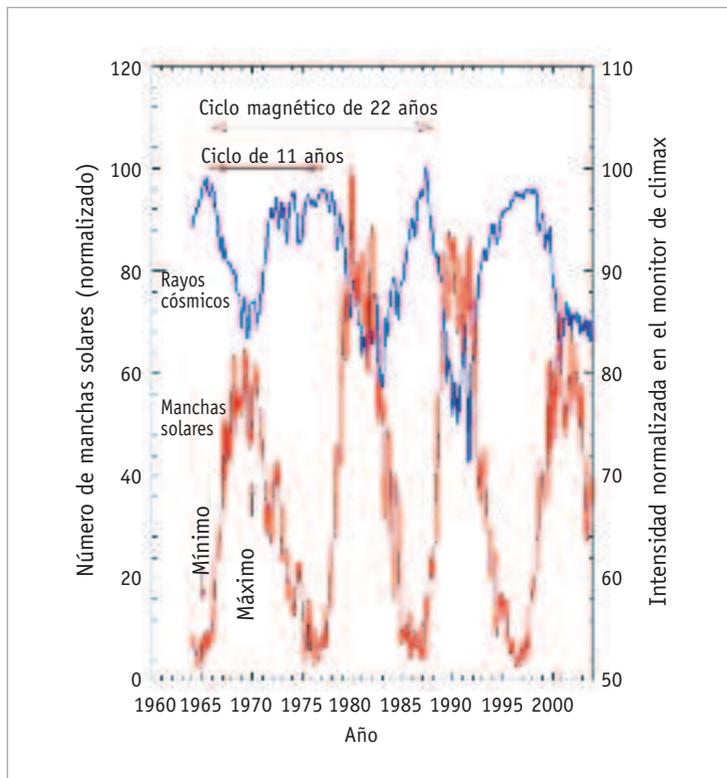
## EL SOL Y LOS RAYOS CÓSMICOS

Más allá del dominio terrestre está el medio interplanetario, donde el campo magnético del Sol es “arrastrado” por el viento solar, formando la cavidad denominada heliosfera. La heliosfera es una cavidad magnetizada; sus límites son aún inciertos, pero se estima que se extiende hasta alrededor de 100 unidades astronómicas (una unidad astronómica es la distancia media del Sol a la Tierra). En esta vasta región del espacio, los rayos cósmicos de bajas energías (menores a 100 gigaelectrón volts) provenientes de nuestra galaxia, son afectados por la presencia del campo magnético heliosférico. Este campo cambia con el ciclo solar, haciéndose más turbulento a medida que el Sol aumenta su actividad. Una mayor turbulencia dificulta la entrada de los *rayos cósmicos galácticos* a las regiones interiores de la heliosfera, donde se encuentra la Tierra. Los rayos cósmicos galácticos son modulados por la actividad solar: cuando el Sol está quieto, tenemos una gran abundancia de rayos cósmicos que va reduciéndose con el aumento de la actividad solar, hasta llegar a un mínimo, que coincide con el máximo de actividad solar. Al igual que el Sol, los rayos cósmicos galácticos también presentan un ciclo, al cual se ha denominado *ciclo de modulación solar* (ver Figura 3).

La existencia del ciclo de modulación solar posibilita el estudio de la actividad del Sol y de la estructura de la heliosfera, usando a los rayos cósmicos como aproximación. Este hecho resulta crucial si queremos reconstruir la actividad del Sol hacia el pasado, pues los rayos cósmicos producen en la atmósfera diversos isótopos radioactivos llamados *núcleos cosmogénicos*. Éstos, por ejemplo el carbono-14 o el berilio-10, se depositan en sistemas como los árboles o los sedimentos marinos y lacustres, que hacen las veces de “archivos”, mediante los cuales se pueden investigar los ciclos de modulación solar que ocurrieron hace cientos e incluso miles de años. Mediante estudios de este tipo se ha comprobado que el Sol ha tenido en el pasado periodos de actividad muy reducida con respecto a la actual (Caballero-López y colaboradores, 2004). Por ejemplo, durante la época conocida como el *mínimo de*

*Maunder*, que ocurrió aproximadamente entre 1645 y 1715, la cantidad de rayos cósmicos aumentó considerablemente. En este tiempo se observó una reducida actividad solar. Coincidentemente, la segunda mitad del siglo XVII marcó en la Tierra un periodo de intenso frío. Ésta y otras épocas que presentan hechos similares han motivado la investigación de la influencia del Sol en el clima terrestre (véase el artículo “Efectos del Sol sobre el clima y los seres vivos” en este número de *Ciencia*). El único registro que podemos usar para investigar la actividad solar anterior a 1600 es el de los rayos cósmicos galácticos, a través de los núcleos cosmogénicos depositados en sistemas terrestres. Es así como los rayos cósmicos galácticos pueden ayudarnos a conocer no sólo la actividad solar, sino también el clima en el pasado terrestre.





**Figura 3.** Ciclo de actividad solar y de modulación de la intensidad de los rayos cósmicos registrados en un monitor de neutrones.

### RAYOS CÓSMICOS SOLARES

Durante las explosiones llamadas *fulguraciones solares*, el astro rey emite grandes cantidades de energía en forma de luz visible, ultravioleta, ondas de radio, rayos X y ocasionalmente rayos gamma, pero también produce partículas energéticas. A estas partículas se les conoce con el nombre de *rayos cósmicos solares*. Son detectados generalmente a bordo de naves espaciales, aunque ocasionalmente pueden llegar a la superficie terrestre. Actualmente hay evidencias que sugieren que los rayos cósmicos solares más energéticos podrían alcanzar energías de 100 gigaelectrón volts. El conjunto de las emisiones solares durante las fulguraciones nos proporciona información valiosa para dilucidar el escenario donde se produce la liberación de energía; con ello obtenemos claves

para imaginar cómo deben ser los entornos astrofísicos donde se generan los rayos cósmicos galácticos.

La lluvia cósmica que baña continuamente nuestro planeta trae mezcladas consigo las marcas de su origen y de todos los medios astrofísicos que atravesó antes de llegar hasta nosotros. El papel de los científicos es desenredar esta madeja y encontrar de dónde proviene cada una.

### Bibliografía

- Caballero-López, R. A., H. Moraal, K. G. McCracken y F. B. McDonald (2004), "The heliospheric magnetic field from 850 to 2000 AD inferred from <sup>10</sup>Be records", *J. Geophys. Res.*, 109, A12102.
- Longair, M., (1993), *High Energy Astrophysics: An Informal Introduction for Students of Physics and Astronomy*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Otaola, J. y J. F. Valdés-Galicia (1992), *Los rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas*, México, Fondo de Cultura Económica, colección "La Ciencia para Todos", núm. 108.

**Rogelio Antonio Caballero López** obtuvo el título de físico y el de maestro en ciencias físico-matemáticas (especialidad en física nuclear) por la Universidad Estatal Lomonosov de Moscú. Posteriormente, en el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), cursó una segunda maestría sobre turbulencia magnética en el medio interplanetario, obteniendo el título de maestro en física espacial, así como el doctorado en el tema de los rayos cósmicos. Desarrolló una estancia posdoctoral en el Instituto de Ciencia Física y Tecnología de la Universidad de Maryland. Es autor de más de diez artículos en revistas internacionales arbitradas, ha participado en varios congresos de rayos cósmicos y actualmente es investigador del Instituto de Geofísica de la UNAM. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores. rogelioc@geofisica.unam.mx

**José Francisco Valdés Galicia** obtuvo el grado de físico en la Facultad de Ciencias de la UNAM; se doctoró en el *Imperial College* de la Universidad de Londres. Actualmente está adscrito al Instituto de Geofísica como investigador y director. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Ha publicado artículos en revistas arbitradas de alto impacto y trabajos en las memorias de los congresos internacionales de rayos cósmicos. Ha sido editor huésped en varias revistas internacionales especializadas, e invitado como profesor/investigador a diversas instituciones educativas en el extranjero. Los detectores de radiación cósmica instalados en Ciudad Universitaria, D.F., y en el volcán Sierra Negra, en Puebla, están a su cargo. Es miembro de la Colaboración Internacional Auger, donde participan 250 investigadores de 18 países. Desde 1999 es integrante de la Comisión de Rayos Cósmicos de la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada, de la cual es vicepresidente. jfvaldes@geofisica.unam.mx