

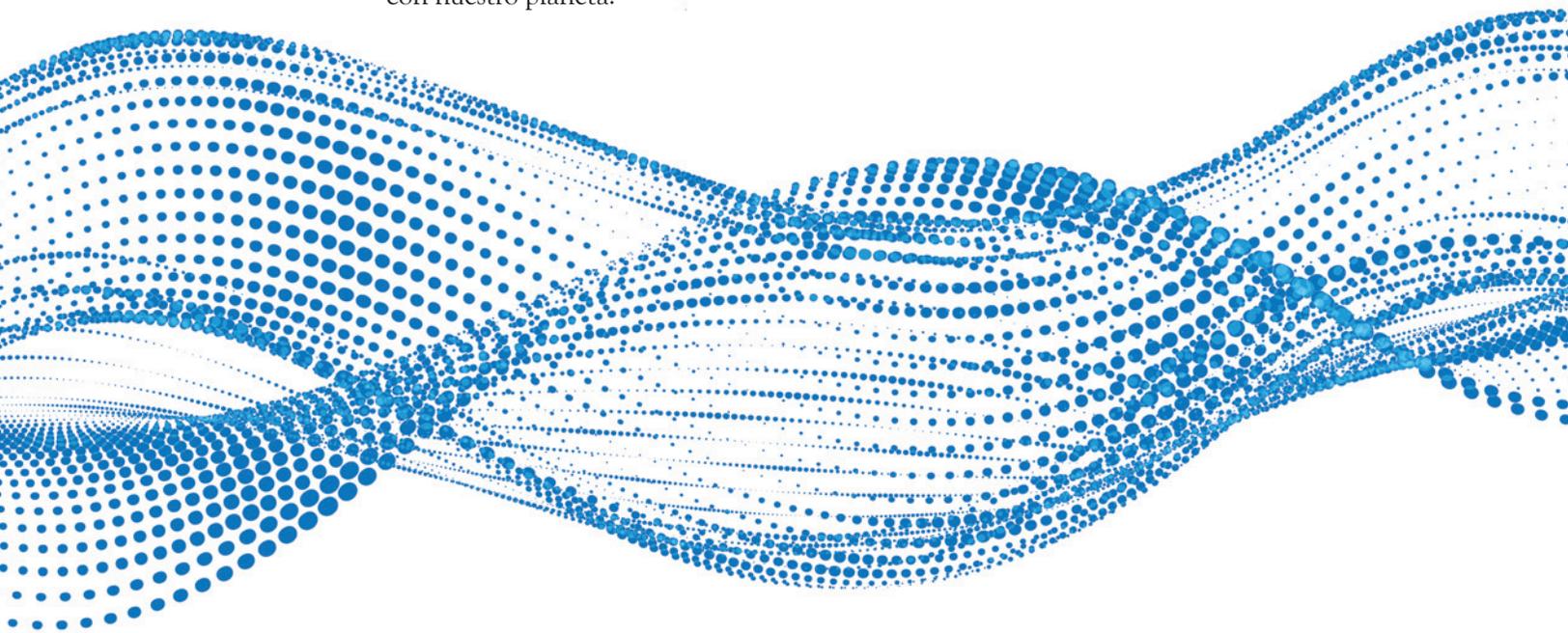
Luis Xavier González Méndez y Ernesto Ortiz Fragoso

Los rayos cósmicos: una extraordinaria aventura espacial

Los rayos cósmicos son partículas que constantemente bombardean la parte superior de nuestra atmósfera. Su principal característica es el amplio rango de energía que cubren. Varias investigaciones sugieren que esta radiación puede afectar el clima y la biota. Actualmente, el origen de los rayos cósmicos sigue siendo objeto de investigación y se desarrollan diferentes experimentos y estudios para dilucidarlo. En México tenemos varios observatorios dedicados a su estudio.

Origen, composición y energía

La Tierra está en constante interacción con diferentes tipos de radiaciones que provienen del espacio exterior; por ejemplo, luz visible, ondas de radio, rayos ultravioleta, rayos X, rayos gama y rayos cósmicos. Estos últimos son partículas que bombardean la alta atmósfera de la Tierra por todas direcciones y pueden alcanzar las energías más altas del universo. Su estudio trata de explicar interrogantes como su origen, composición, mecanismos de aceleración y su interacción con nuestro planeta.



En 1912 el físico austriaco Víctor Hess descubrió los rayos cósmicos tras realizar una serie de ascensos en globo aerostático para estudiar la descarga que experimentaban unas delgadas placas de metal dentro de un **electroscopio**. Entonces se creía que los materiales radiactivos de las rocas emitían radiación ionizante que generaba dicha descarga; por ende, al alejarse de la superficie terrestre, esta radiación debía disminuir. Pero con cada ascenso Hess observó que los electroscopios tendían a descargarse en mayor medida conforme el globo incrementaba su altura. Esto lo llevó a concluir que la causa de la descarga de los electroscopios era una radiación de origen extraterrestre. El descubrimiento de la radiación cósmica lo hizo ganador del premio Nobel en 1936.

Los rayos cósmicos se catalogan en función de su energía: ultra alta energía ($\geq 10^{18}$ eV), alta energía ($\geq 10^{10}$ eV) y baja energía ($< 10^9$ eV). Con base en los últimos estudios, se sabe que los rayos cósmicos de ultra alta energía provienen de fuera de la Vía Láctea y son acelerados dentro del núcleo de una clase de galaxias denominadas activas (véase la Figura 1). Este tipo de galaxias tiene en su centro un hoyo negro supermasivo (millones de veces la masa del Sol) que acelera la materia cercana y provoca interacciones altamente energéticas, las cuales pueden producir rayos cósmicos que salen de la influencia del hoyo negro supermasivo y llegan a alcanzar a nuestra galaxia y al Sistema Solar.

Por otra parte, los rayos cósmicos de alta energía se producen dentro de la Vía Láctea, en eventos catastróficos llamados supernovas, en los que las estrellas masivas (más de cinco veces la masa del Sol) explotan y producen una onda de choque que se propaga a altas velocidades; esta onda de choque acelera a las partículas que encuentra a su paso (véase la Figura 1).

Por último, los rayos cósmicos de baja energía se producen por los diferentes fenómenos que ocurren en la atmósfera del Sol, como el viento solar, las fulguraciones y las

Electroscopio

Instrumento que permite cargar eléctricamente dos láminas delgadas, aisladas herméticamente, las cuales experimentan una fuerza de repulsión por poseer la misma carga.

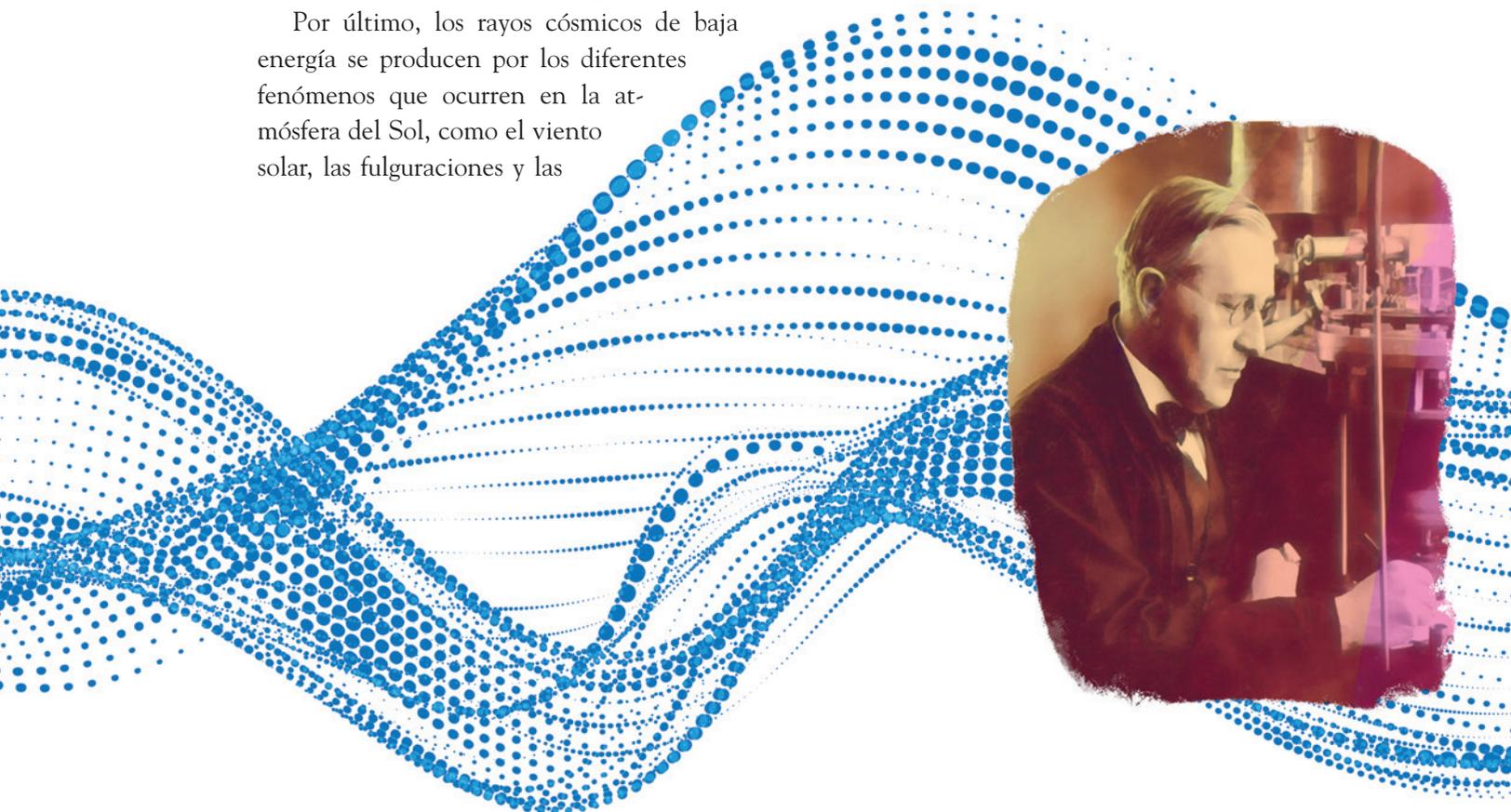




Figura 1. De izquierda a derecha, fuentes de rayos cósmicos de ultra alta energía (galaxia activa), de alta energía (supernova) y de baja energía (Sol). Imágenes tomadas de NASA, ESA y SDO, respectivamente.

eyecciones de masa coronal. Debido a la cercanía con nuestra estrella (unos 150 millones de km), los rayos cósmicos de alta energía son modulados por las emisiones solares, lo que provoca que los rayos cósmicos de baja energía dominen el flujo de partículas registradas que llegan a la atmósfera.

Gracias a los diferentes instrumentos diseñados para detectar estas partículas, sabemos que el flujo de rayos cósmicos de baja energía es de unas 10 000 partículas por m^2 por segundo. El flujo de los rayos cósmicos con energías mayores se reduce considerablemente; de este modo, para energías de 10^{15} eV, se detecta una partícula por m^2 por año. Para los rayos cósmicos de ultra alta energía, el flujo es de una partícula por km^2 por año (Otaola y Valdés-Galicia, 1992).

La composición de los rayos cósmicos se determina en función de la energía considerada y representa las condiciones físicas del medio en el que se produjeron y desde donde se propagaron. En promedio, se puede considerar que el flujo de rayos cósmicos está compuesto por 89% de protones, 10% de núcleos de helio y 1% de núcleos de otros elementos de la tabla periódica más pesados, electrones, neutrones y antimateria.

Isotrópica

Propiedad física que no presenta diferencias significativas con la dirección. Para los rayos cósmicos, implica que su flujo es constante en cualquier dirección.

Los rayos cósmicos en la atmósfera y su detección

Debido a que los rayos cósmicos son, en su inmensa mayoría, partículas cargadas, se ven afectados en su camino hacia la atmósfera terrestre por el campo geomagnético. De este modo, los rayos cósmicos me-

nos energéticos son desviados, siguiendo una espiral, por las primeras líneas del campo magnético terrestre. Por lo tanto, sólo las partículas más energéticas pueden atravesar las líneas del campo geomagnético e ingresar por las zonas ecuatoriales de la Tierra.

Los rayos cósmicos primarios que ingresan a la alta atmósfera terrestre generan interacciones en función de la energía original de la partícula incidente. Existen tres tipos de interacción: la excitación, la ionización y el rompimiento del núcleo atmosférico. Cuando los rayos cósmicos primarios de baja energía, emitidos por el Sol, pasan lo suficientemente cerca de los átomos en la atmósfera superior, les transfieren energía y los excitan, lo que provoca que los átomos excitados emitan luz con distintas frecuencias o colores, para después regresar a su estado de energía original. Este proceso de excitación produce lo que conocemos como “auroras”. Por otra parte, cuando los rayos cósmicos primarios tienen mayor energía, se pueden producir colisiones con la estructura electrónica de los átomos o con el núcleo mismo. Es más frecuente que se produzcan colisiones con la estructura electrónica; en este caso, la partícula primaria choca y arranca un electrón del átomo atmosférico, lo que produce la ionización. Por último, la interacción menos frecuente, pero más energética, se produce cuando los rayos cósmicos primarios que penetran la atmósfera terrestre de forma **isotrópica** colisionan con los núcleos del material atmosférico; debido a estas colisiones nucleares se generan los rayos cósmicos secundarios, también conocidos como chubascos atmosféricos.

Existen tres componentes en el chubasco atmosférico: la hadrónica o nucleónica, la electromagnética y la dura o muónica (véase la Figura 2, Otaola y Valdés-Galicia, 1992). La componente hadrónica se produce cuando el átomo se rompe y genera hadrones o núcleos de elementos más ligeros. Mientras cuenten con energía suficiente, éstos continúan colisionando con los núcleos atmosféricos y provocando que la componente hadrónica se propague de forma longitudinal con la dirección del rayo cósmico primario (Grieder, 2001). Por otra parte, la componente dura o muónica está formada por muones y neutrinos resultantes del decaimiento de piones y kaones cargados de la componente hadrónica y de otros procesos menos dominantes. Por último, del decaimiento de piones neutros y, en menor cantidad, de muones y otras partículas, se forma la componente electromagnética, integrada por rayos gama de alta energía y electrones. Esta componente se multiplica vía la producción de pares y la emisión *bremstrahlung*, que son procesos físicos llevados a cabo por los rayos gama y los electrones, respectivamente.

Últimamente se han impulsado las colaboraciones científicas internacionales para desarrollar observatorios que detecten los rayos cósmicos primarios y secundarios. Conforme ingresan a la atmósfera, las partículas interactúan y pierden energía; por lo tanto, los rayos cósmicos primarios sólo pueden ser registrados por satélites. Para detectar los rayos cósmicos secundarios, se requieren observatorios a nivel de superficie o sobre globos y aviones, donde haya detectores específicos para cada una de las tres componentes del chubasco atmosférico.

En México tenemos varios observatorios dedicados a la detección de rayos cósmicos. El observatorio de rayos cósmicos de la Ciudad de México (a 2 274 msnm) está compuesto por un monitor de neutrones y un telescopio de muones. El observatorio de rayos cósmicos en la cima del volcán Sierra Negra (4 580 msnm) consta del telescopio de neutrones solares y el telescopio centellador de rayos cósmicos, que detectan las componentes hadrónica y muónica del chubasco atmosférico (véase la Figura 3). Otros experimentos en nuestro país que puede detectar chubascos atmosféricos son, por mencionar

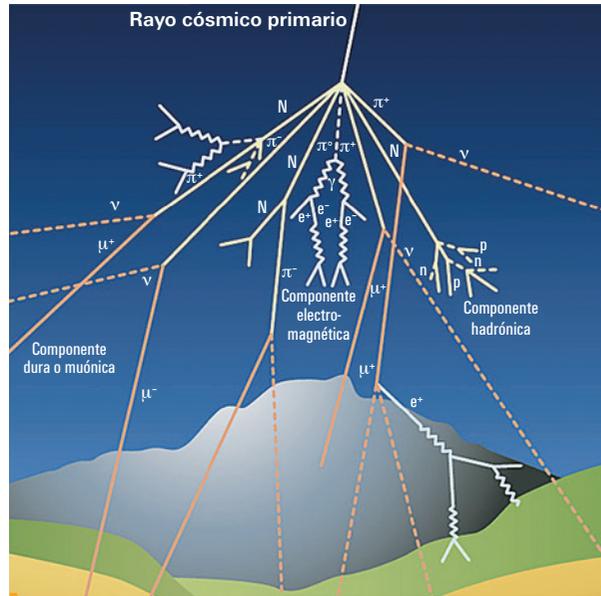


Figura 2. Representación de un chubasco atmosférico de rayos cósmicos. Tomada de AUGER.

algunos, los observatorios HAWC (High-Altitude Water Cherenkov), LAGO (Latin American Giant Observatory) y el proyecto Escaramujo.

Los rayos cósmicos, el clima y la biota

En 1953, los bioquímicos estadounidenses Stanley Miller y Harold Urey demostraron de manera expe-





rimental que un aminoácido simple puede producirse por descargas eléctricas inducidas en una mezcla de gases (Atri y Melott, 2014). Lo anterior fortalece la idea de que las descargas eléctricas en la atmósfera terrestre, muy probablemente, tuvieron un papel importante en el origen de la vida, al interactuar con una “sopa” prebiótica (agua, metano, amónico, etcétera) y formar moléculas complejas como los aminoácidos, ácido ribonucleico, entre otros, que son necesarios precursores de la vida (Erlykin y Wolfendale, 2010).

La posible importancia de los rayos cósmicos en el origen de la vida se debe a la formación de los chubascos atmosféricos como fuente de partículas atmosféricas, y en particular de electrones, que son elementales para la generación de las descargas eléctricas. Todo lo relacionado con las condiciones eléctricas de la atmósfera, incluidas las descargas eléctricas, tiene que ver con los rayos cósmicos en el sentido de que representan una fuente importante de iones cerca de la superficie y son la fuente principal a altitudes mayores de unos pocos kilómetros (Erlykin y Wolfendale, 2010). Además,

se propone que los rayos cósmicos tienen alguna influencia en la producción de los núcleos de condensación de nubes, en el circuito eléctrico global en la atmósfera y en la nucleación de hielo y otros procesos microfísicos en las nubes, lo que sugiere un vínculo entre los rayos cósmicos, las nubes y el clima (Kirkby, 2008).

Desde la formación de la Tierra (hace 4 500 millones de años) y hasta nuestros días, el entorno astronómico ha sido variable y, con él, el espectro de rayos cósmicos. Existen tres fuentes principales que generan los cambios en la intensidad de la radiación cósmica: el campo geomagnético, el Sol –por medio del viento solar y de sus eventos explosivos, como las ráfagas y las eyecciones de masa coronal– y las fuentes de rayos cósmicos. Los dos primeros influyen en las variaciones presentes en la intensidad de partículas de baja energía, mientras que la tercera fuente influye en todo el rango de energías (Erlykin y Wolfendale, 2010).

La vida en la Tierra se ha desarrollado bajo una constante interacción con la radiación cósmica, cuyas fuentes son entidades astrofísicas: desde los



Figura 3. Observatorios de rayos cósmicos en la Ciudad de México (2 274 msnm) y en la cima del volcán Sierra Negra (4 580 msnm).

remanentes de supernovas hasta las grandes explosiones en nuestra propia estrella, el Sol. Los eventos caracterizados por grandes incrementos de radiación cósmica, tanto fotones (por ejemplo, rayos X o rayos gama) como protones y otros núcleos de alta energía, presentan un peligro potencial para la biósfera.

Para cualquier especie, un mecanismo que participa incluso a intensidades moderadas es la ionización de la atmósfera terrestre, lo que conduce a cambios químicos –específicamente en la disminución del ozono estratosférico– y, con ello, a un aumento en el flujo de la radiación ultravioleta (UV) proveniente del Sol a la superficie terrestre. La radiación UV es extremadamente peligrosa para la mayor parte de la vida en la Tierra debido a su absorción por el material genético del ADN y la posterior ruptura de enlaces químicos, lo que a menudo conduce a la mutación o muerte celular; por ejemplo, la radiación UV es letal para los microorganismos que se encuentran en la base de la cadena alimenticia en el océano (Melott y Thomas, 2011).

Luis Xavier González Méndez

Laboratorio Nacional de Clima Espacial/Servicio de Clima Espacial México, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
xavier@igeofisica.unam.mx

Ernesto Ortiz Fragoso

Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.
eortiz@encit.unam.mx



Lecturas recomendadas

- Atri, D. y A. L. Melott (2014), “Cosmic rays and terrestrial life: A brief review”, *Astroparticle Physics*, 53:186-190.
- Erlykin, A. D. y A. W. Wolfendale (2010), “Long term time variability of cosmic rays and possible relevance to the development of life on Earth”, *Surv. Geophys*, 31:383-398.
- Grieder, P. K. F. (2001), *Cosmic rays at Earth*, Ámsterdam, Elsevier Science.
- Kirkby, J. (2008), *Cosmic Rays and Climate*, Ginebra, CERN.
- Melott, A. L. y B. C. Thomas (2011), “Brief review and census of intermittent intense sources”, *Astrobiology*, 11(4):343-361.
- Otaola, J. A. y J. F. Valdés-Galicia (1992), *Los Rayos Cósmicos: Mensajeros de las Estrellas*, México, Fondo de Cultura Económica (Colección La Ciencia Desde México, 108).