

Rayos cósmicos: la humanidad debajo de una cascada de partículas

ELIZABETH AMÉRICA FLORES FRÍAS, TADEO DARINEY GÓMEZ AGUILAR Y MARÍA DEL PILAR RODRÍGUEZ ROJAS.

La Dra. Flores Frías es egresada de la UAEMor, donde obtuvo el título de Ingeniería Química y la Maestría y Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Actualmente se encuentra haciendo su posdoctorado en el Instituto de Ciencias Físicas (ICF) de la UNAM, desarrollando síntesis de inhibidores de corrosión mediante plasma. El Mtro. Gómez Aguilar es Ingeniero en Sistemas Computacionales (Universidad Valle del Grijalva) y Maestro en Física (Universidad Autónoma de Chiapas). Actualmente es candidato al grado de Doctor en Ciencias (Física) en el ICF-UNAM. Su investigación se enfoca en la cosmología del universo temprano, con especial atención al estudio de Agujeros Negros Primordiales y Ondas Gravitacionales. La Dra. María del Pilar Rodríguez Rojas es egresada de la UAEMor, donde obtuvo el título de Ingeniera Química, la Maestría en Ingeniera de Materiales y el Doctorado en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables. Su investigación se centra en el reciclaje del nylon 6.6 para la elaboración de recubrimientos poliméricos tratados con plasma, para reducir su impacto ambiental. Actualmente forma parte del Laboratorio de Espectroscopia y Plasmas Atmosféricos en el ICF-UNAM.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

Debajo de una cascada de partículas

“Las cascadas nos enseñan que, aun en medio del caos inherente, la vida fluye en un ritmo hermoso y armonioso.” Gómez-Flores

Cada segundo, miles de partículas invisibles atraviesan nuestro cuerpo sin que lo notemos. Vienen del espacio profundo, viajando millones de años luz, y cayendo sobre la Tierra como una lluvia silenciosa. A esta lluvia la llamamos rayos cósmicos, y aunque su nombre sugiere haces de luz, en realidad son partículas subatómicas que viajan a velocidades vertiginosas. ¿De dónde vienen? ¿Cómo interactúan con nosotros y con nuestro planeta? ¿Podrían afectarnos o enfermarnos?

En este artículo, exploraremos el origen, la naturaleza y el impacto de estos mensajeros cósmicos que, sin pedir permiso, fluyen a través de nuestro cuerpo.

¿Qué son los rayos cósmicos y por qué importan?

Los rayos cósmicos son partículas subatómicas que viajan por el universo a

velocidades cercanas a la de la luz. Aunque su existencia fue descubierta hace más de un siglo, su origen aún encierra varios misterios. Lo que sí sabemos con certeza es que la mayoría de ellos tienen un origen galáctico o extragaláctico, y que sus trayectorias, alteradas por campos magnéticos en el espacio, hacen que lleguen a nuestro planeta desde todas las direcciones del cielo [1]. Aproximadamente el 95% de los rayos cósmicos que alcanzan la atmósfera terrestre están formados por protones de alta energía; el resto está compuesto por núcleos de helio y otros elementos más pesados [1]. Algunas de estas partículas poseen energías tan colosales que superan ampliamente las que se logran en aceleradores humanos, como el Gran Colisionador de Hadrones. Esto plantea preguntas fundamentales: ¿qué procesos naturales pueden acelerar partículas a tales velocidades? ¿Y de dónde vienen? Las hipótesis actuales sobre el origen de los rayos cósmicos señalan a algunos de los fenómenos más energéticos del universo, como explosiones de supernovas, núcleos galácticos activos, discos de acreción alrededor de agujeros negros supermasivos e incluso procesos ocurridos en el universo primitivo. En estos escenarios, mecanismos como la aceleración de Fermi permiten que las partículas reboten repetidamente entre ondas de choque o regiones con intensos campos magnéticos, ganando energía en cada paso hasta alcanzar valores extremos.

Durante años, se consideró que podían generarse en destellos de rayos gamma: breves pero intensas emisiones de radiación electromagnética de altísima energía, capaces de liberar en segundos más energía que la que emitirá el Sol a lo largo de toda su vida. Estos estallidos suelen estar asociados al colapso de estrellas muy masivas o a la fusión de estrellas de neutrones, y se pensaba que podían acelerar partículas hasta energías extremas.

Sin embargo, si los rayos cósmicos de ultra alta energía tuvieran este origen, deberían venir acompañados de un flujo detectable de neutrinos: partículas elementales extremadamente ligeras y sin carga eléctrica, que apenas interactúan con la materia. Para dimensionarlo, en el instante en que lees estas líneas, cientos de miles de millones de neutrinos procedentes del Sol atraviesan tu cuerpo y la Tierra entera sin detenerse. Observatorios como IceCube, en la Antártida, han buscado estas señales coincidentes, pero hasta ahora no han encontrado la correlación esperada, lo que debilita la hipótesis de los destellos de rayos gamma como fuente principal.

Un avance reciente del experimento Telescope Array, en Utah, ha permitido identificar que al menos algunos de estos rayos cósmicos extremos están compuestos principalmente por protones, lo que refuerza la posibilidad de que

provengan de fuentes astrofísicas localizables y no de partículas exóticas. Este resultado representa un paso importante hacia la resolución de uno de los enigmas más persistentes de la astrofísica moderna [2]. Cuando los rayos cósmicos chocan con las moléculas de la atmósfera, se produce una cascada de partículas secundarias (Figura 1), como piones, muones y neutrinos, que pueden llegar hasta la superficie de la Tierra [1].

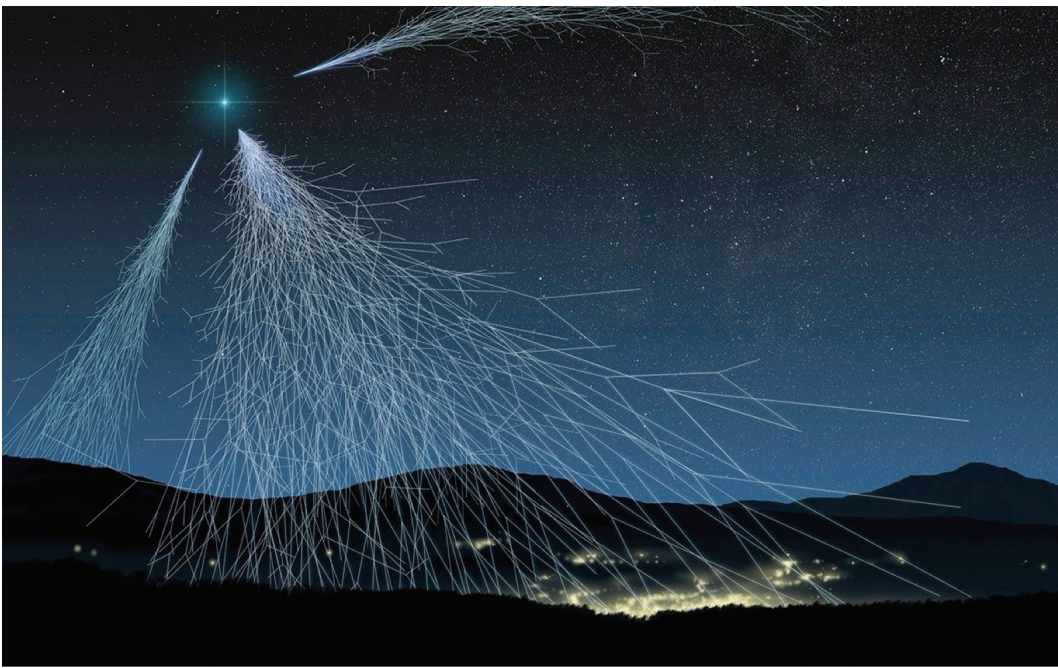


FIGURA 1. REPRESENTACIÓN de un chubasco de partículas generada por un rayo cósmico de ultra alta energía al ingresar a la atmósfera terrestre. Cada línea traza la trayectoria de partículas secundarias creadas por la colisión del rayo cósmico con los átomos de la atmósfera. Estas lluvias pueden ser detectadas por observatorios especializados en la Tierra, permitiendo estudiar fenómenos de origen astrofísico extremo y las condiciones más energéticas del universo. Imagen obtenida de la ref. [1].

Este proceso no solo nos revela información sobre lo que sucede más allá de nuestra galaxia, sino que también ha abierto nuevas ventanas a la investigación científica.

¿Cómo se detectan los rayos cósmicos?

Uno de los principales observatorios dedicados a esta tarea se encuentra en México: el *High Altitude Water Cherenkov Observatory* (HAWC), ubicado en las faldas del volcán Sierra Negra, en Puebla, a más de 4,100 metros sobre el nivel del mar (Figura 2). HAWC utiliza más de 300 tanques llenos de agua purificada para captar la luz de Cherenkov (un destello azulado que se produce cuando partículas cargadas viajan más rápido que la luz en ese medio) [3, 4]. Esta luz permite reconstruir la dirección, energía y tipo de partícula que llegó desde el cosmos. A diferencia de los telescopios ópticos, HAWC opera las 24 horas del día, incluso en condiciones climáticas adversas, ya que no necesita cielos despejados ni mirar directamente a una fuente puntual [3].

Por otro lado, en la provincia de Mendoza (Argentina) se encuentra el Observatorio Pierre Auger (Figura 2), el más grande del mundo para el estudio de

rayos cósmicos de ultra alta energía. Su diseño combina dos tipos de instrumentos: detectores de superficie distribuidos en una vasta llanura, y telescopios de fluorescencia que observan la tenue luz emitida por las partículas cuando excitan las moléculas del aire (Figura 2). Juntos, permiten reconstruir con gran precisión la energía y trayectoria de los rayos cósmicos más extremos jamás registrados [5].

Gracias a estos observatorios, no solo podemos detectar la llegada de partículas provenientes de los confines del universo, sino que también podemos poner a prueba algunas de las ideas más profundas de la física moderna. Entre todas las partículas que llegan del cielo, hay unas en particular que se han convertido en



FIGURA 2. SUPERIOR, el observatorio HAWC, donde cada tanque puede almacenar aproximadamente 200,000 litros de agua purificada. Estos tanques tienen un diámetro de 7.3 metros y una altura de 4.5 metros (Crédito de la imagen J. Goodman, Nov. 2016) [3]. Abajo izquierda, uno de los detectores de superficie del Observatorio Pierre Auger. Estos tanques cilíndricos están equipados con paneles solares, antenas y sistemas de registro autónomos para detectar las partículas secundarias que llegan a nivel del suelo tras la colisión de rayos cósmicos de ultra alta energía con la atmósfera. Al fondo se observa la cordillera de los Andes. Imagen obtenida de: https://www.astronomie.nl/instrument/pierre-auger-cosmic-ray-observatory-23. Abajo Derecha, detectores de fluorescencia que registran el paso de la cascada de partículas secundarias a través de la atmósfera. Imagen cortesía del M. Sc. Pedro Alfonso Valencia Esquipula.

abundancia en el suelo coincide perfectamente con las predicciones relativistas. Si la relatividad especial no funcionara, estos mensajeros cósmicos simplemente no llegarían hasta nosotros.

Más allá de comprobar teorías fundamentales como la relatividad especial, los rayos cósmicos también han dejado su huella en aspectos insospechados de nuestra vida cotidiana, incluso en algo tan delicado como la democracia.

Un voto desde el espacio: cuando los rayos cósmicos alteraron una elección

En 2003, durante una elección federal en la ciudad de Schaerbeek, Bélgica, ocurrió algo que sorprendió a las autoridades electorales y a los ingenieros informáticos: uno de los candidatos recibió exactamente 4,096 votos de más. No hubo evidencia de fraude, ni errores humanos o fallos eléctricos evidentes. Después de una minuciosa investigación, los especialistas propusieron una causa poco común, pero científicamente plausible: una partícula venida del espacio exterior había alterado un bit en la memoria de la máquina de votación [7,8].

Este fenómeno se conoce como *Single Event Upset (SEU)*, y ocurre cuando una partícula subatómica altamente energética (como un protón solar o un muón generado por rayos cósmicos) impactan un componente sensible de un circuito electrónico, como una celda de memoria. Las computadoras trabajan en base binaria, es decir, representan todos los datos mediante bits, la unidad más simple de información, que puede tener solo dos estados: 0 o 1. Físicamente, esos estados corresponden a dos niveles distintos de voltaje en los circuitos: por ejemplo, ausencia de voltaje (0) o presencia de voltaje (1). Cada bit en un número binario tiene un “peso” que equivale a una potencia de dos; el bit número 12 tiene el valor de $2^{12} = 4096$. Si ese bit pasa de 0 a 1 por un error, el contador aumenta exactamente en 4,096 unidades. Y esto corrobora la hipótesis más aceptada físicamente, la cual es que una partícula ionizante, posiblemente generada por el clima espacial, ya sea por una tormenta solar o por un rayo cósmico extragaláctico, a través de la atmósfera, llegó hasta la máquina de votación

y provocó ese cambio. Aunque no dejó rastro visible, el error fue detectado gracias a la inusual cantidad de votos asignados a un solo candidato, lo que motivó una auditoría [7, 8]. Casos como este son extremadamente raros, pero nos recuerdan que la infraestructura electrónica de la que depende gran parte de nuestra vida moderna, desde los aviones y los satélites hasta los teléfonos, autos autónomos o procesos democráticos, “no son inmunes a los caprichos del universo”. Incluso una partícula invisible, nacida en una supernova lejana o en una llamarada solar, puede alterar la historia... aunque sea por un bit. Detectar y estudiar los rayos cósmicos no es solo una cuestión de física teórica: es una forma de entender cómo lo invisible puede tener consecuencias visibles en la Tierra.

¿Y son peligrosos para nosotros?

En condiciones normales, no representan una amenaza significativa para la salud. Esto se debe, en parte, a que la atmósfera terrestre actúa como un escudo natural que bloquea la mayor parte de la radiación más energética antes de que llegue al nivel del suelo. Además, los muones son partículas con una interacción extremadamente débil con la materia: pueden atravesar incluso cientos de metros de roca sin detenerse. El cuerpo humano, por su parte, ha evolucionado en presencia de un fondo constante de radiación natural, incluida la de origen cósmico. Y la dosis que recibimos a nivel del mar es tan baja que representa solo una fracción mínima de la radiación que podríamos recibir, por ejemplo, durante una radiografía dental. Sin embargo, hay situaciones en las que la exposición a estos rayos cósmicos se incrementa y podría volverse relevante. En los vuelos de avión, la atmósfera es más delgada a gran altitud, por lo que hay una mayor penetración de radiación cósmica. Por ello, pilotos y tripulaciones reciben dosis más altas que quienes permanecen en tierra. En el espacio exterior, como en la Estación Espacial Internacional, los astronautas están mucho más expuestos, lo cual obliga a considerar estrategias de blindaje especiales. También en las regiones

polares, donde la protección del campo magnético terrestre es menor, se puede registrar un aumento en la intensidad de esta radiación. Ahora bien, ¿podría esta radiación causar mutaciones o incluso cáncer? En teoría, sí. Como cualquier forma de radiación ionizante, una partícula de alta energía que impacte directamente una cadena de ADN podría inducir una mutación. Pero la probabilidad de que eso ocurra debido a un muón atmosférico, en condiciones normales, es extremadamente baja. Los casos conocidos de enfermedades provocadas por radiación están relacionados con exposiciones mucho más intensas y prolongadas, como las que ocurren por accidentes nucleares, uso excesivo de radioterapia o contacto con materiales radiactivos. Y sin embargo, lejos de ser una amenaza, los rayos cósmicos se han convertido en una herramienta fascinante para la ciencia. Su presencia nos ha permitido desarrollar técnicas innovadoras, como la *muografía*, la cual se basa en medir cuántos muones llegan a los detectores colocados alrededor o debajo de una estructura (Figura 3). Como los muones se atenúan al pasar por materiales más densos, los científicos pueden construir una imagen tridimensional de su interior, identificando cavidades, túneles o zonas más densas. En otras palabras, menos muones implican zonas compactas y más muones delatan cavidades. Gracias a esta técnica, se han descubierto cámaras ocultas en monumentos milenarios, como las pirámides de Egipto (Figura 3). Un caso destacado en México es el de la Pirámide del Sol en Teotihuacán, donde en 2017 un equipo del Instituto de Física de la UNAM, liderado por Arturo Menchaca y colaborando con el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), instaló detectores de muones para investigar posibles cámaras internas. El análisis reveló anomalías en la distribución de muones que sugieren la presencia de estructuras no documentadas previamente, abriendo nuevas posibilidades para comprender la construcción y uso de este imponente edificio prehispánico [9]. Otras aplicaciones recientes de esta técnica incluyen el análisis de ciclones en Japón, el estudio de la dinámica interna de glaciares alpinos y la inspección de un reactor nuclear en Francia que actualmente se encuentra en proceso de desmantelamiento [10].

Reflexión final

A lo largo de este viaje entre partículas invisibles y estructuras colosales, queda claro que los rayos cósmicos son mucho más que visitantes silenciosos del espacio: son herramientas, testigos y actores en la historia de nuestra evolución. Comprenderlos es entender que

la ciencia traduce las huellas del cosmos, las hace tangibles y les da sentido. En esa tradición, en ese diálogo entre lo inmenso y lo diminuto, la humanidad sigue descubriendo nuestro lugar en el cosmos.

Referencias:

1. Foro Nuclear. (s.f.). ¿De dónde proceden los rayos cósmicos? ForoNuclear.org. <https://www.foronuclear.org/discubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-fisica-nuclear/de-donde-proceden-los-rayos-cosmicos/>
2. Padavic-Callaghan, K. (2025, July 11). We may have finally solved an ultra-high-energy cosmic ray puzzle. New Scientist. <https://www.newscientist.com/article/2487950-we-may-have-finally-solved-an-ultra-high-energy-cosmic-ray-puzzle/>
3. HAWC Collaboration. (s.f.). *High Altitude Water Cherenkov Observatory*. <https://www.hawc-observatory.org/>
4. Organismo Internacional de Energía Atómica. (s.f.). ¿Qué es la radiación Cherenkov? <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-radiacion-cherenkov>
5. Astronomie.nl. (s.f.). *Pierre Auger Cosmic Ray Observatory*. <https://www.astronomie.nl/instrument/pierre-auger-cosmic-ray-observatory-23>
6. Relativismo. (s.f.). *El experimento de los muones*. <https://relativismo.weebly.com/experimento-de-los-muones.html> IAEA.
7. ScienceDirect. (s.f.). *Single event upset*. En *Earth and Planetary Sciences*. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/single-event-upset>
8. Johnston, I. (2017, February 17). *Cosmic particles can change elections and cause planes to fall through the sky, scientists warn*. The Independent. <https://www.independent.co.uk/news/science/subatomic-particles-cosmic-rays-computers-change-elections-planes-autopilot-a7584616.html>
9. Rueda, A. (2017, 6 de noviembre). *Con muones, descubren “gran vacío” en pirámide de Keops*. Instituto de Física, UNAM. <https://www.fisica.unam.mx/organizacion/comunicacion/noticia.php?id=1542>
10. Organismo Internacional de Energía Atómica. (s.f.). *Imagenología muónica: el uso de rayos cósmicos para analizar pirámides y volcanes*. IAEA. <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/imagenologia-muonica-rayos-cosmicos-piramides-volcanes>

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos.

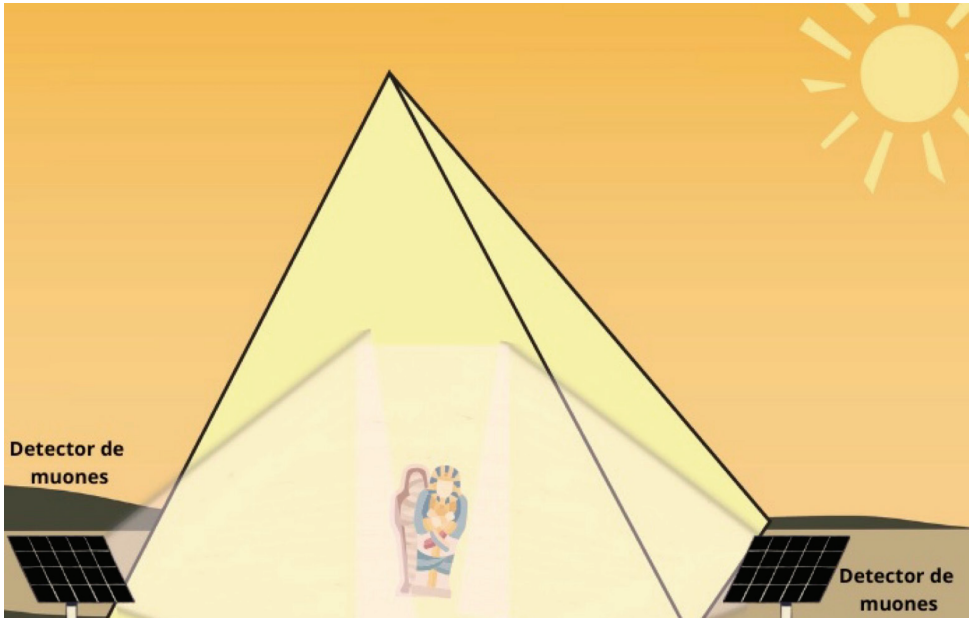


FIGURA 3. LOS detectores de muones ubicados debajo de una pirámide o en sus costados capturan los muones que la atraviesan, lo que ayuda a generar una imagen de la estructura interna de la pirámide. Imagen inspirada en Imagenología muónica de una pirámide mediante dos detectores (Infografía: A. Vlasov/OIEA) [10].