



1. UN APARATO DE RAYOS X NATURAL: Estudios recientes muestran que los rayos emiten erupciones de rayos X mientras abren sus zigzagueantes canales conductores por la atmósfera. Las energías de los rayos X llegan a 250.000 electronvolt, más o menos el doble de energía que los rayos X aplicados en medicina.

El rayo

Nuevas investigaciones subrayan la sorprendente complejidad de las tormentas eléctricas. El rayo sigue planteando problemas desconcertantes

Joseph R. Dwyer

Los rayos causan más muertos y heridos que los huracanes o los tornados. Atacan de repente, sin ningún signo preanunciador; a veces incluso cuando en la vertical no hay ni una nube. Relampaguean en la Tierra alrededor de cuatro millones de veces al día. Se los ha observado en otros planetas. Y, sin embargo, todavía ignoramos qué los causa.

No es cierto que Benjamín Franklin resolviese el problema cuando realizó su famoso experimento de la cometa en 1752. Sólo probó que el rayo es un fenómeno eléctrico. Hasta el día de hoy, sigue sin saberse de qué modo las tormentas generan su carga eléctrica y producen la descarga. Algunos han aventurado que los rayos cósmicos inician el

proceso. Esas partículas de alta energía, al bombardear la Tierra desde el espacio, desencadenan en la atmósfera cascadas de electrones veloces.

Se ha descubierto hace poco una nueva vía de investigación: examinar los rayos X que se emiten cuando cae un rayo desde la nube hasta el suelo. En los últimos años, nuestro grupo ha medido los rayos X producidos tanto por rayos tormentosos naturales como por rayos de origen artificial, generados mediante el lanzamiento de cohetes durante una tormenta. Los resultados sugieren que el rayo abre sus irregulares canales conductores enviando ráfagas de electrones de alta velocidad. Pero acerca de cómo se aceleran esos electrones, sólo hay

confusión. Para resolver el misterio, estamos construyendo un conjunto de detectores de rayos X en un lugar de Florida.

No son meras chispas

En algunos aspectos, el rayo se parece a una gran chispa. Pensemos en una chispa corriente, como la que se produce cuando se toca el pomo de una puerta tras haber andado por una alfombra. Los zapatos desprenden electrones, de modo que acumulamos carga eléctrica. Nos rodea así un campo eléctrico. Cuando el campo es débil, el aire constituye un buen aislante: los electrones se unen a los átomos de oxígeno a mayor velocidad que se desprenden por acción de los choques; la corriente eléctrica no circula en cuantía apreciable. Pero cuando los dedos se acercan al pomo, el campo eléctrico se refuerza localmente. Si alcanza un valor crítico de unos tres millones de volts por metro (campo de ruptura), el aire se vuelve conductor y se produce la descarga: una corriente salva el hiato entre la mano y el pomo.

La electrización de las tormentas comparte algunas semejanzas con el ejemplo de la alfombra. En el interior de la nube tormentosa, el papel de los zapatos sobre la alfombra le corresponde, con toda probabilidad, al granizo blando —formado por gránulos de nieve— que cae entre los cristales de hielo y las gotículas de agua. (Todavía se debate acerca de los detalles del proceso.) Cuando estas partículas chocan entre sí, pueden arrancar electrones y adquirir carga eléctrica. Las cargas positivas y las negativas se separan después por la acción de las corrientes ascendentes y la gravedad, con lo que se genera una diferencia de potencial. Pero si tratamos de llevar más allá

la analogía del pomo, tropezamos con un serio problema: las decenas de medidas realizadas mediante globos, aviones y cohetes directamente en el interior de las nubes rara vez han encontrado campos de intensidad superior a 200.000 volts por metro. Tamaña intensidad basta para causar en el aire una ruptura, como ocurre cuando tocamos el pomo.

Hasta hace poco, dos eran las explicaciones preferidas. Según la primera, cabría la existencia de campos eléctricos más intensos en el interior de las tormentas, pero sólo en volúmenes más pequeños, por lo que costaría medirlos. Aunque la observación no ha podido descartar tal hipótesis, no resulta satisfactoria, pues con ella sólo reemplazamos un problema por otro: ¿cómo se producen campos eléctricos tan intensos en volúmenes de nube tan pequeños? La segunda explicación proviene de los experimentos que muestran que el campo eléctrico necesario para producir una descarga disminuye apreciablemente cuando hay gotas de agua o partículas de hielo en el aire, como ocurre en el interior de las tormentas. Por desgracia, añadir lluvia o hielo sólo alivia parte de la discrepancia; el campo en las tormentas todavía parece demasiado débil para generar una descarga común.

Tampoco se está muy seguro acerca de cómo atraviesa el rayo varios kilómetros de aire. El proceso comienza con la formación de una guía, un canal caliente que ioniza el aire y transporta cargas a lo largo de grandes distancias (véase el recuadro “La breve vida del rayo”). La guía no se propaga hasta el suelo sin solución de continuidad; lo hace a través de una serie de pasos discretos. No se sabe con exactitud de qué manera.

Estas dificultades han conducido a muchos, entre los que me cuento, a preguntarse si no se nos habrá escapado algo importante. Tal vez no deba considerarse al rayo una descarga corriente, análoga a una chispa en el pomo de una puerta. Existe otra clase de descarga, menos habitual: la “ruptura desbocada”.

En una descarga corriente, los electrones se mueven despacio porque sufren constantes choques con las moléculas del aire. Los choques crean una fuerza de arrastre efectiva, semejante a la que se siente cuando se saca la mano por la ventana de un coche: cuanto mayor es la velocidad, más aumenta la fuerza de rozamiento, y cuando el coche frena, disminuye. Pero si las velocidades de los electrones adquieren cierto valor —al menos seis millones de metros por segundo, que viene a ser un dos por ciento de la velocidad de la luz— la fuerza de arrastre decrece tanto más cuanto más deprisa se mueven los electrones (véase la figura 2). Si un campo eléctrico intenso acelera un electrón de alta velocidad, la fuerza de rozamiento disminuye; entonces, el electrón se mueve a mayor velocidad todavía, con lo que se reduce aún más la fuerza de rozamiento, y así sucesivamente. En esas condiciones, los electrones pueden acelerarse hasta casi la velocidad de la luz; es decir, adquirir enormes cantidades de energía y producir la “descarga desbocada”.

Este proceso requiere una población inicial de electrones con altas energías. En 1925, C. T. R. Wilson planteó que la desintegración de isótopos radiactivos o los choques de las partículas de los rayos cósmicos con las moléculas del aire quizá generasen electrones de alta energía que se desbocarían en los campos eléctricos del interior de la nube de tormenta. Por desgracia, el modelo de Wilson predecía un número de electrones desbocados producidos por la desintegración radiactiva y los choques de rayos cósmicos demasiado escaso para generar rayos.

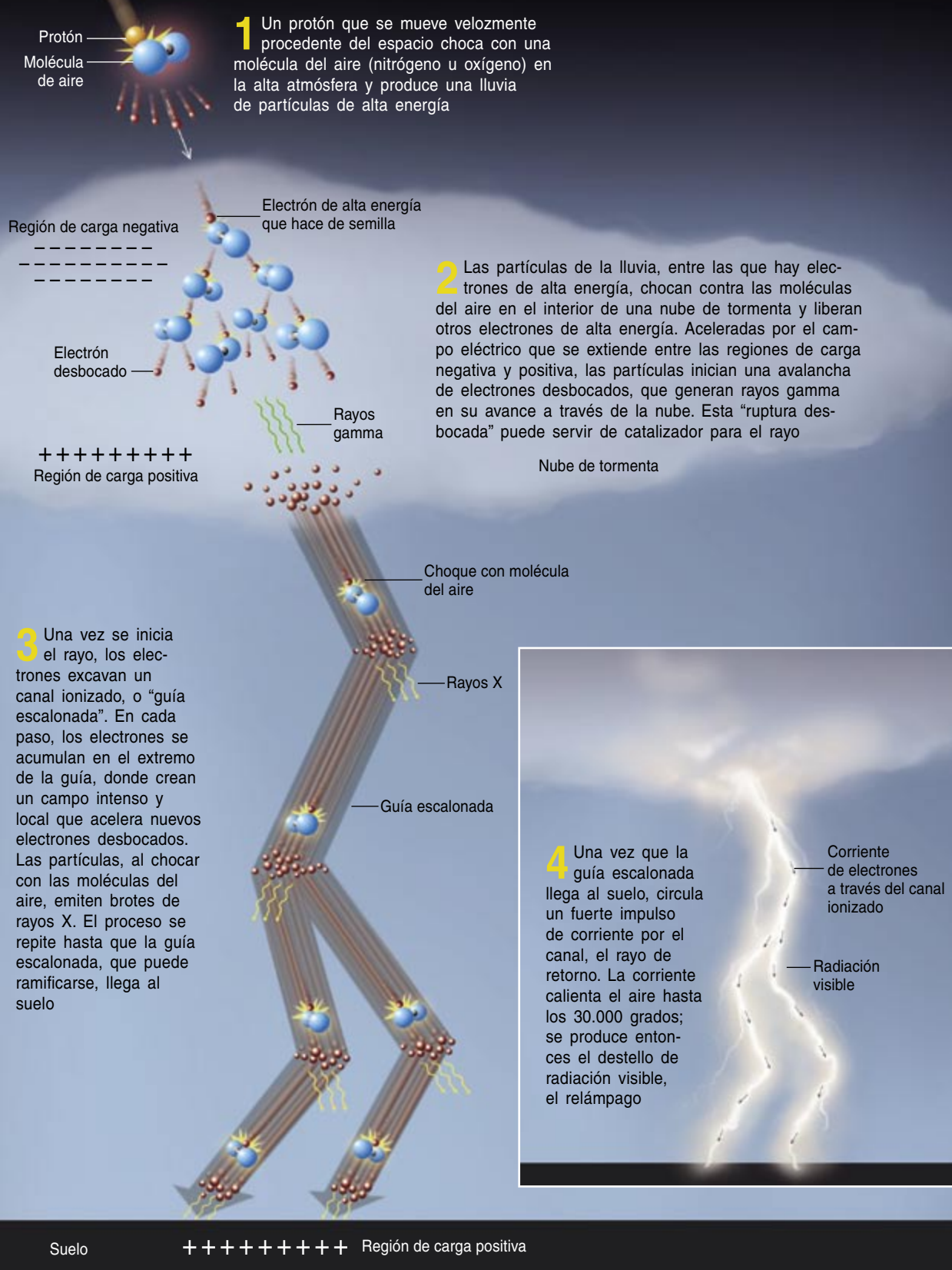
En 1961, Alexander V. Gurevich, del Instituto Lebedev de Física de Moscú, propuso otro mecanismo de producción de electrones desbocados. Mostró que se los podía crear en cuantía notable dentro de cam-

Resumen/La naturaleza del relámpago

- Los rayos de las tormentas desconciertan a los físicos. Los campos eléctricos del interior de las tormentas no parecen tener la intensidad suficiente para generar una descarga eléctrica ordinaria.
- El reciente descubrimiento de emisiones de radiación X en los rayos de las tormentas apoya la hipótesis de que éstos, de una manera aún desconocida, aceleran los electrones hasta casi la velocidad de la luz; a este fenómeno se le llama “ruptura desbocada”.
- Se está instalando en Florida un conjunto de detectores de rayos X para estudiar los procesos que inician los relámpagos y permiten su propagación.

LA BREVE VIDA DEL RAYO

Algunos creen que el desencadenamiento de los rayos de las tormentas puede deberse a los rayos cósmicos, las partículas de alta energía que bombardean la Tierra desde el espacio.



ALISON KENDALL



pos eléctricos muy intensos si se los aceleraba directamente a partir de la ubicua población de electrones libres de baja energía. Desaparecía así el problema con que tropezó Wilson: la escasez de electrones de alta energía. Para generar tales electrones desbocados, Gurevich recurría a la fuerza bruta, con campos eléctricos tan intensos, que algunos de los electrones de baja energía se aceleraban rápidamente hasta alcanzar y superar el umbral de energía más allá del cual pueden desbocarse. El problema de este mecanismo es que requiere un campo eléctrico unas diez veces mayor que el campo de ruptura ordinario, mucho mayor, a su vez, que los campos observados en las tormentas. En pocas palabras: los físicos parecían estar encaminándose en una dirección errónea.

Finalmente, en 1992 surgió una idea que prometía llegar a explicar lo que sucede en el interior de las tormentas y cómo se produce el rayo. Gurevich, junto con Genady M. Milikh, de la Universidad de Maryland, y Robert Roussel-Dupré, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, propusieron el modelo de la *Avalancha Relativista de Electrones Desbocados*. De acuerdo con este modelo, los propios electrones desbocados generan, al chocar bruscamente con las moléculas del aire y arrancar otros electrones de alta energía, más electrones de alta energía que servirán de nuevas semillas para el proceso. Estos electrones arrancados se desbocan y chocan con otras moléculas del aire, se producen entonces más electrones semilla, y así sucesivamente. Se crea una gran avalancha de electrones de alta energía que crece exponencialmente con el tiempo y la distancia. Puesto que este proceso lo puede iniciar un solo electrón de alta energía que haga de semilla, basta el fondo continuo de choques de rayos có-

smicos y desintegraciones radiactivas para desencadenar una avalancha de electrones desbocados. Y mientras la avalancha no salga de una región de intenso campo eléctrico, seguirá creciendo indefinidamente. El resultado será una ruptura desbocada.

Además, a diferencia de la antigua hipótesis de Gurevich, este nuevo modelo de la ruptura desbocada requiere un campo eléctrico de una intensidad de sólo una décima parte de la requerida para una ruptura normal en aire seco. A la altura de las nubes tormentosas, donde la densidad del aire es menor que al nivel del mar, el campo eléctrico necesario para esta clase de ruptura desbocada es de unos 150.000 volts por metro, dentro del margen de los valores que se miden en las tormentas. No debe de ser una coincidencia que vengan casi a coincidir el máximo campo eléctrico observado en el interior de las nubes de tormenta y el requerido para una ruptura desbocada; mis cálculos han mostrado que la ruptura desbocada no tardaría en descargar el campo eléctrico si aquella fuera mucho más intensa.

En una descarga normal, los electrones tienen bajas energías y viajan bastante despacio, de modo que la radiación electromagnética que se emite se extiende sólo hasta los ultravioletas. Por el contrario, en una ruptura desbocada los electrones, que se mueven a gran velocidad, ionizan gran número de moléculas del aire y producen rayos X de alta energía y rayos gamma. (El fenómeno se conoce con la expresión alemana *bremsstrahlung*, que significa radiación de frenado.) Por consiguiente, una manera de comprobar si hay ruptura desbocada es buscar rayos X.

Relámpagos de rayos X

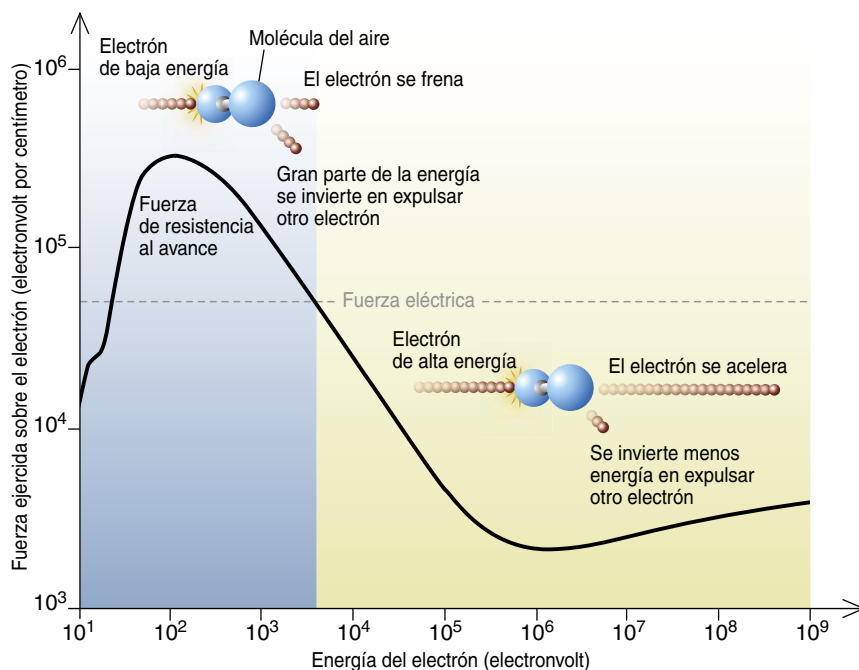
Desde los años treinta, con el acicate primero de las hipótesis de Wilson y luego del trabajo de Gurevich, se viene intentado observar la formación de rayos X en las tormentas eléctricas. Cuesta tanto, que hasta hace muy poco sólo se han tenido resultados ambiguos. Una de las dificultades reside en que los rayos X no se propagan largas distancias en el interior de la atmósfera: son absorbidos a unos pocos cientos de metros de la fuente. Otro problema es que

las tormentas constituyen ambientes electromagnéticamente ruidosos. Los rayos, en particular, emiten grandes cantidades de ruido en radiofrecuencias, que causan a muchos kilómetros de distancia los conocidos chirridos de las radios de onda media. Para detectar los rayos X hay que registrar señales eléctricas muy débiles. Tratar de realizar una medición así en la vecindad de las tormentas es como intentar oír una conversación en un lugar muy ruidoso. Como puede resultar difícil distinguir las señales eléctricas reales producidas por los rayos X de las señales espurias debidas a las emisiones de radiofrecuencia, muchos de los primeros resultados se recibieron con escepticismo.

La situación mejoró en el decenio de 1980, cuando George K. Parks, Michael P. McCarthy y sus colaboradores de la Universidad de Washington realizaron observaciones desde aviones en el interior de tormentas. Más tarde, Kenneth B. Eack, actualmente en el Instituto de Minería y Tecnología de Nuevo México (NMT), y sus colaboradores acometieron una serie de sondeos mediante globos en el interior de nubes tormentosas. Estas observaciones proporcionaron valiosos indicios de que las tormentas producen a veces grandes brotes de rayos X. No se pudo determinar la fuente, pero la radiación parecía guardar relación con campos eléctricos reforzados presentes en el interior de las nubes. En ocasiones, la emisión de rayos X comenzaba justo antes de que se observaran los relámpagos y cesaba una vez se habían producido, quizá porque los rayos cortocircuitaban el campo eléctrico que requiere la ruptura desbocada.

No se conoce mecanismo alguno, aparte de la ruptura desbocada, capaz de producir tamañas cantidades de rayos X en nuestra atmósfera. No hay otros fenómenos asociados con las descargas de las tormentas eléctricas a los que se puedan atribuir las emisiones: aunque calientan el aire hasta los 30.000 grados —cinco veces la temperatura de la superficie del Sol—, apenas se producen rayos X a esta temperatura.

Por fin, en 2001 se halló una conexión directa entre los rayos X y las chispas: Charles B. Moore y sus colaboradores del NMT observaron



2. LOS ELECTRONES “DESBOCADOS” abren el camino de los rayos. Los electrones de baja energía, que se mueven despacio, pierden más energía por los choques con las moléculas de aire de la que ganan por efecto del campo eléctrico; van, pues, perdiendo cada vez más velocidad. Pero como los electrones de alta energía pierden así menos energía, el campo eléctrico puede acelerarlos hasta casi la velocidad de la luz.

radiación de alta energía, presumiblemente radiación X, procedente de descargas de rayos sobre la cima de una alta montaña. A diferencia de las anteriores observaciones con aviones y globos, esta radiación de alta energía parecía producida por el propio rayo y no por los campos eléctricos a gran escala del interior de la nube tormentosa. Además, las emisiones ocurrían durante la primera fase del rayo; el movimiento de la guía desde la nube hasta el suelo. Esta observación constituía toda una novedad.

Mi contribución empezó en ese punto. Como físico, siempre me ha interesado la manera en que se producen los rayos X y gamma. Aunque estas radiaciones son corrientes en el espacio, donde el vacío permite a las partículas de alta energía viajar sin impedimento, resultan mucho más raras en la Tierra. De ahí que me fascinara el modelo de ruptura desbocada de Gurevich, Milikh y Rousset-Dupré, según el cual la misma clase de rayos X que se genera en las fulguraciones solares se produce en tormentas y relámpagos. Para comprobar si existían esos rayos X,

aproveché las diarias tormentas de verano de la Florida central.

El año 2002, con apoyo de la Fundación Nacional de la Ciencia, mi grupo del Instituto de Tecnología de Florida, en colaboración con Martin A. Uman y su grupo de la Universidad de Florida, inició una campaña sistemática de búsqueda de radiación X emitida por los rayos de las tormentas. Para reducir el problema de las señales espurias, colocamos detectores sensibles de rayos X en el interior de pesadas cajas de aluminio que impedían la entrada de la humedad, la luz y el ruido de radiofrecuencia. Instalamos nuestros instrumentos en el Centro Internacional de Investigación y Prueba de Relámpagos (ICLRT) de Camp Blanding. El ICLRT está equipado para medir, entre otras cosas, los campos eléctricos y magnéticos y las emisiones ópticas asociadas a los rayos. Además, la instalación está preparada para desencadenar artificialmente rayos en tormentas naturales por medio de pequeños cohetes.

Cuando sobre el ICLRT estalla una tormenta y el campo eléctrico alcanza en el suelo varios miles de volts por

metro, se lanza un cohete de un metro de largo desde una torre de madera. El cohete desenrolla un carrete de alambre de cobre recubierto de kevlar, un extremo del cual queda unido al suelo. Al subir el cohete hasta una altura de 700 metros, el alambre vertical anclado en el suelo refuerza el campo eléctrico en la punta del cohete; se tiene así una guía que se propaga verticalmente y va introduciéndose en la nube tormentosa. La corriente eléctrica que asciende desde el suelo hasta la guía vaporiza rápidamente el alambre. Alrededor de la mitad de los lanzamientos provocan rayos en las nubes situadas encima; por lo general caen sobre el lanzador de cohetes.

Tanto los rayos naturales como los artificiales se componen generalmente de varias descargas. En los rayos provocados, cada descarga se inicia con una columna de carga que se propaga hacia abajo, el “dardo guía”; en la cercanía del suelo sigue más o menos el camino abierto por el cohete y el alambre. Aporta carga negativa desde la nube e ioniza el canal en su movimiento de avance. Una vez ha conectado con el suelo, se crea un cortocircuito y a través del canal fluye un gran impulso de corriente, el “rayo de retorno”, que calienta rápidamente el canal y produce el relámpago, la emisión óptica que vemos; la rápida dilatación subsiguiente del aire caliente crea el trueno. Tras el rayo de retorno puede venir otro rayo conductor, con lo que se repite el proceso. La rápida sucesión de descargas induce el parpadeo del canal guía.

En los rayos naturales, desempeña el papel del cohete una guía escalonada que abre el camino ionizado, extendiéndose mediante tramos irregulares desde la nube hasta el suelo. Las descargas subsiguientes de los rayos naturales, sin embargo, se inician mediante un dardo guía. Se asemejan, pues, a las descargas de los rayos provocados. La ventaja de estudiar estos últimos es que se puede controlar el momento exacto y el lugar del rayo. Y mejor aún, podemos repetir una y otra vez el experimento. Cada verano, se provocan docenas de rayos en el ICLRT.

A decir verdad, dada la larga historia de resultados negativos y ambiguos con rayos X, no esperaba,



3. SE PROVOCA UN RAYO en el Centro Internacional de Investigación y Pruebas de Rayos (ICLRT) de Florida mediante el lanzamiento de un pequeño cohete desde una torre de madera (*recuadro*) durante una tormenta. El cohete, al desenrollar un alambre que lleva corriente desde el suelo, crea un camino para el rayo. Instrumentos situados en la vecindad miden la energía y la intensidad de los rayos X emitidos.

cuando instalamos nuestros instrumentos en el ICLRT, que llegásemos a captarlos. Por eso, tras haber acometido las primeras mediciones de relámpagos provocados, dejé en el cajón de la mesa los resultados. Transcurrida una semana larga, representé gráficamente con mi alumno Maher Al-Dayeh los datos de los detectores de rayos X. Para mi sorpresa —y la de casi todos los demás—, descubrimos que los rayos provocados producían grandes cantidades de

rayos X casi en cada ocasión. Eran tan intensos, que nuestros instrumentos quedaban temporalmente cegados por la radiación.

Los experimentos que efectuamos al año siguiente mostraron que los dardos guía de los rayos producen la emisión de rayos X, posiblemente con alguna contribución del comienzo de las descargas de retorno. Las energías de los rayos X alcanzan unos 250.000 electronvolt, el doble más o menos de la energía de una

radiografía de tórax. Esa emisión de rayos X no se produce continuamente, sino en rápidos estallidos separados por una millonésima de segundo. Si tuviéramos visión de rayos X, los rayos nos parecerían muy diferentes. A medida que el rayo guía se propaga hacia abajo, veríamos una rápida serie de brillantes destellos descendiendo desde las nubes. Los destellos se irían intensificando al acercarse al suelo, con un estallido final muy intenso en el instante de iniciarse el rayo de retorno. Aunque el subsiguiente impulso de corriente brillaría en luz visible, aparecería negro en rayos X.

La emisión de rayos X por los rayos de una tormenta indica que alguna forma de ruptura debe intervenir para que los electrones se aceleren hasta el punto de desprender una radiación de *bremsstrahlung*. Pero resulta que nuestras medidas no encajan bien con el modelo de Gurevich, Milikh y Roussel-Dupré. Los rayos X que observamos tenían energías mucho más bajas que las predichas por ese modelo de la avalancha; la propia intensidad de los brotes fue mucho más alta de lo esperado. Los resultados apuntan a que los campos eléctricos producidos por las descargas guía son muchísimo mayores de lo que antes se había creído posible. Tiene su ironía que nuestros experimentos indiquen por ahora que el mecanismo que opera en las descargas guía se parece más al antiguo modelo de ruptura desbocada de Gurevich: aquel que en 1961 requería un campo eléctrico tan intenso que se descartó. Sigue siendo un misterio la manera en que los relámpagos generan campos eléctricos tan intensos, pero las venideras observaciones de rayos X deberán orientarnos al respecto.

Desde el descubrimiento inicial de la radiación X procedente de los rayos provocados, hemos observado también en el ICLRT varias descargas eléctricas naturales. Los datos correspondientes mostraron buenas emisiones de rayos X procedentes de la fase de la guía reforzada, una confirmación de las anteriores medidas del NMT. Además, los rayos X llegaban en rápidos brotes justo en los instantes en que la guía iniciaba el camino hacia abajo. Este resultado demuestra que la ruptura desbocada

participa en el guiado escalonado: determina dónde irá el rayo y cómo se bifurcará. Un mecanismo similar entra también en funcionamiento durante las fases de dardo guía de las descargas subsiguientes.

Las emisiones de rayos X de las descargas naturales se parecen mucho, pues, a las que se detectan en las provocadas. Está cada vez más claro que la ruptura desbocada es un fenómeno común de nuestra atmósfera. Pese a que las moléculas del aire dificultan la aceleración de los electrones veloces, observamos indicios de rupturas desbocadas incluso cerca del suelo, donde el aire es más denso. (La mayoría de los rayos X que observamos provenían de los 100 metros inferiores, más o menos, del canal del rayo eléctrico.) Por lo tanto, la ruptura desbocada debería ocurrir con mayor frecuencia a la altura de las tormentas.

Otra vez en la tormenta

Volvamos a la iniciación del rayo dentro de la tormenta. En los últimos años, se han construido modelos prometedores en los que la acción combinada de las lluvias de partículas creadas por el impacto de la radiación cósmica y la ruptura desbocada genera los rayos. Como basta un electrón semilla de alta energía para desencadenar una gran avalancha de electrones desbocados, la descarga generada por una intensa lluvia de rayos cósmicos —millones de partículas semilla de alta energía que lleguen simultáneamente— debe de ser enorme. Una descarga de esa magnitud aportará un reforzamiento local del campo eléctrico en el frente de la avalancha; por una razón: el gran aumento de la carga eléctrica en dicho frente. Este refuerzo equivaldría a la cercanía de un dedo y el pomo de una puerta; el campo eléctrico se intensificaría brevemente hasta el punto de que se generase una ruptura eléctrica ordinaria.

Nuestros experimentos en el ICLRT del verano de 2004 aportaron un extraordinario elemento de juicio a favor de la existencia de rupturas desbocadas en las nubes. Durante el lanzamiento del último cohete de la campaña, captamos un enorme estallido de radiación de muy alta energía —rayos gamma, no rayos X— con tres detectores colocados a 650 me-

tros del canal del relámpago. Las energías de los fotones de esos rayos gamma superaban los 10 millones de electronvolt; eran 40 veces mayores que las energías de la radiación X que habíamos observado previamente en las guías de rayos.

Basándonos en nuestras mediciones de la corriente del canal del relámpago, los campos eléctricos y las propiedades de los rayos gamma, hemos deducido que la fuente de la emisión se hallaba a muchos kilómetros de altura, en el interior de la nube tormentosa. No esperábamos ver rayos gamma procedentes de esta altitud porque la atmósfera absorbe dicha radiación, pero al parecer la intensidad de la fuente era tan grande, que algunos fotones consiguieron llegar hasta el suelo. Este descubrimiento da a entender que debieron de producirse poderosas rupturas desbocadas en la nube en un proceso relacionado con la iniciación del rayo provocado. Nuestras observaciones demuestran que es posible observar el fenómeno desde el suelo, lo que resulta mucho más sencillo que subir los detectores a bordo de aviones o globos. Además, se ha sabido hace poco que el Creador de Imágenes Espectroscópicas Solares de Alta Energía Reuven Ramary (RHESSI) detectó brotes de rayos gamma asociados a tormentas parecidos al nuestro desde su órbita a 600 kilómetros de altura.

Con una nueva subvención de la Fundación Nacional de Ciencia de los EE.UU., estamos ahora incrementando el número de instru-



mentos de rayos X en el ICLRT de cinco a más de 36; cubrirán un kilómetro cuadrado de la instalación de Camp Blanding. Este incremento debería mejorar nuestra capacidad de estudiar los relámpagos naturales y provocados; esperamos que aumente la probabilidad de detectar brotes de rayos gamma procedentes de las nubes tormentosas. Las emisiones de rayos X y gamma servirán de sonda de los campos eléctricos en regiones difíciles de medir por otros medios. Con esos datos deberíamos entender mejor los procesos de rotura que inician el rayo y facilitan su propagación.

El recurso a la radiación X para estudiar los rayos se encuentra dando los primeros pasos. Por eso, cada vez que llevamos a cabo un experimento hallamos algo que no conocíamos antes. Ya hemos descubierto que el rayo no es una chispa ordinaria de la misma clase que las que se producen cuando se toca el pomo de una puerta. Se trata de un tipo de descarga mucho más extraño, que produce electrones desbocados y rayos X.

El autor

Joseph R. Dwyer es profesor de física y ciencias del espacio en el Instituto de Tecnología de Florida. Tras doctorarse por la Universidad de Chicago en 1994, investigó en las de Columbia y Maryland. El autor agradece las aportaciones a esta investigación de H. Rassoul, V. Rakov, M. Al-Dayed, J. Jerauld, L. Caraway, B. Wright, K. Rambo y D. Jordan.

Bibliografía complementaria

- THE ELECTRICAL NATURE OF STORMS. Donald R. McGorman y W. David Rust. Oxford University Press, 1998.
- THE LIGHTNING DISCHARGE. Martin A. Uman. Dover Publications, 2001.
- ENERGETIC RADIATION PRODUCED DURING ROCKET-TRIGGERED LIGHTNING. Joseph R. Dwyer *et al.* en *Science*, vol. 299, págs. 694-697; 31 de enero, 2003.
- LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS. Vladimir A. Rakov y Martin A. Uman. Cambridge University Press, 2003.