

FÍSICA ATMOSFÉRICA

DUENDES, ELFOS Y CHORROS AZULES

Nuevos hallazgos sobre la microfísica de los eventos luminosos transitorios permiten ahondar en la comprensión de las tormentas eléctricas

Alejandro Luque y Francisco José Gordillo Vázquez

EN SÍNTESIS

Las tormentas no sólo producen descargas eléctricas entre las nubes y el suelo; también generan enormes descargas a decenas de kilómetros de altura. El estudio de estos espectaculares eventos transitorios luminosos (ETL) arroja luz sobre las descargas eléctricas en gases.

Por su carácter misterioso e inesperado, estos fenómenos atmosféricos reciben nombres tan llamativos como duendes, elfos y chorros. Distintos procesos físicos microscópicos explican sus variadas formas, tamaños y duración, así como la naturaleza de la luz que emiten.

A pesar de los enormes avances realizados en la comprensión de los ETL, quedan todavía algunos interrogantes por resolver: ¿cómo influyen en la composición atmosférica? ¿Qué efecto ejercen sobre las corrientes eléctricas que envuelven la Tierra? ¿Existen ETL en otros planetas?

AL MISMO TIEMPO ADMIRABLES Y ESTREMECEDORAS, las tormentas eléctricas constituyen sin duda uno de los mayores espectáculos de la naturaleza. Cada quince milésimas de segundo, un rayo cae sobre algún lugar de la Tierra, liberando una gran cantidad de energía que percibimos mediante el sonido del trueno y la luminosidad del relámpago. Sin embargo, aunque se trata del fenómeno eléctrico más familiar, no es el único. En las capas más altas de la atmósfera se desatan otras manifestaciones menos visibles que, debido a su fugacidad y a que suelen esconderse tras las nubes que las alimentan, no se descubrieron hasta hace apenas veinte años.

EL SUEÑO DE UNA NOCHE DE VERANO

En la noche del 5 al 6 de julio de 1989, un grupo de la Universidad de Minnesota dirigido por John R. Winckler ensayaba una cámara que iba a ser instalada en un cohete para investigar la atmósfera. Por azar, apuntaron hacia un fragmento claro

del cielo sin dar importancia a que, bajo él, en el horizonte, se vislumbraban nubes de una tormenta cientos de kilómetros al norte. Dos fotogramas de su grabación mostraron sobre aquella lejana tormenta intensas emisiones luminosas con una extensión de decenas de kilómetros. Algunos años después, Davis D. Sentman, de la Universidad de Alaska en Fairbanks, se inspiró en *El sueño de una noche de verano*, de William Shakespeare, para bautizar a estas emisiones con el nombre de *sprites*, que en español podríamos traducir por espectros o duendes, evocando su naturaleza esquiva y un tanto misteriosa.

Los duendes observados por Winckler iniciaron una línea de investigación que ha cambiado radicalmente nuestra visión de la mesosfera, la capa de la atmósfera situada entre 50 y 100 kilómetros de altura. Antes tenida por inerte, la mesosfera ha pasado a considerarse el territorio en el que habita, junto a los duendes, una multitud de parientes de los rayos. A estas breves emisiones luminosas causadas por la actividad eléctrica de una tormenta se las denomina eventos luminosos transitorios (ELT).

Fotografía en colores reales de duendes en el norte de la provincia de Barcelona tomada en octubre de 2009. El arco mediterráneo español desde Almería al norte de Cataluña es la zona donde más duendes se producen en Europa. Constituye un auténtico laboratorio natural para la investigación de eventos luminosos transitorios.

Alejandro Luque es especialista en el desarrollo de modelos numéricos de plasmas y, en particular, de descargas eléctricas. Investiga en el Instituto de Astrofísica de Andalucía, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.



Francisco J. Gordillo Vázquez es físico de plasmas y experto en estudios cinéticos de plasmas de baja temperatura alejados del equilibrio. Trabaja en el Instituto de Astrofísica de Andalucía, donde dirige el grupo de plasmas transitorios en atmósferas planetarias.



Además de una gran belleza, esos «fuegos artificiales» naturales revisten un gran interés científico. Por un lado, su estudio nos permite ahondar en la física de la mesosfera, una de las capas atmosféricas más desconocidas. Por otro, su presencia puede alterar la composición química del aire y, tal vez, desempeñar un efecto global sobre la atmósfera y la circulación eléctrica entre sus capas y la superficie terrestre.

FÍSICA DE LAS DESCARGAS

Para comprender los procesos físicos que subyacen a los ELT debemos tener presente las leyes que rigen las descargas eléctricas en gases. La más importante nos dice que la energía de los electrones libres de la atmósfera es proporcional al cociente entre el campo eléctrico (E) y la densidad de moléculas del aire (N). Este cociente, E/N , se denomina *campo eléctrico reducido* y suele expresarse en townsend, en honor a John Sealy Townsend, pionero en el estudio de descargas eléctricas en gases a comienzos del siglo xx (un townsend equivale a 10^{-21} voltios multiplicados por metro cuadrado). Según otro de los principios básicos, los tiempos y las distancias característicos de las reacciones de esos electrones, como la ionización, son inversamente proporcionales a la densidad molecular.

Esas leyes de escala explican que en las capas altas de la atmósfera se produzcan descargas eléctricas kilométricas. Una descarga que a presión atmosférica presenta algunos centímetros de extensión y microsegundos de duración, a 75 kilómetros de altura (donde la densidad del aire es unas 30.000 veces inferior) equivale a una descarga de varios kilómetros y centésimas de segundo.

Dado que el número de electrones libres en el aire suele ser muy reducido, este medio constituye un buen aislante eléctrico (la débil conductividad que presenta se debe al movimiento de iones pesados). Sin embargo, si aplicamos un campo reducido intenso, alguno de esos escasos electrones libres puede adquirir energía suficiente para arrancar otro electrón al chocar contra una molécula, convirtiéndola en un ion con carga positiva. A su vez, este electrón secundario adquiere energía del campo eléctrico, con lo que puede ionizar otras moléculas. Si este proceso continúa, se produce una avalancha en la que el número de electrones libres disponibles para conducir la electricidad crece de forma exponencial. Se produce entonces la ruptura dieléctrica del aire. El campo reducido que la provoca se denomina campo umbral o de ruptura.

¿Cuál es el valor del campo umbral? Veamos primero qué les ocurre a los electrones libres de la atmósfera. Lo más frecuente es que estos choquen con una molécula y le arranquen un electrón o bien que sean atrapados por una molécula o átomo. El primer fenómeno (ionización por impacto electrónico)

incrementa la densidad de electrones libres; el segundo (captura), la disminuye. Nuestra atmósfera está compuesta por un 79 por ciento de nitrógeno molecular y un 20 por ciento de oxígeno molecular (el 1 por ciento restante corresponde a gases residuales como el argón). Por tanto, las ionizaciones más frecuentes son la del oxígeno y la del nitrógeno. Por otra parte, en gases con una proporción notable de oxígeno, el principal mecanismo de pérdida de electrones corresponde a la captura disociativa, mediante la cual un electrón rompe una molécula de oxígeno pero queda acoplado a uno de sus dos átomos, que se convierte en un ion negativo.

La probabilidad de la ionización y la captura depende de la energía de los electrones libres y, por tanto, del campo eléctrico reducido. Cuando el campo es débil, domina la pérdida de electrones (captura), por lo que su densidad es solo residual. Por el contrario, cuando el campo es intenso, cada electrón inicia una avalancha y la densidad de electrones crece rápidamente, transformando el aire en un buen conductor. El valor del campo a partir del cual pierde protagonismo la captura y empieza a dominar la ionización corresponde al campo umbral. Para aire seco asciende a unos 120 townsend; a presión atmosférica, ello equivale a un campo eléctrico de unos tres millones de voltios por metro.

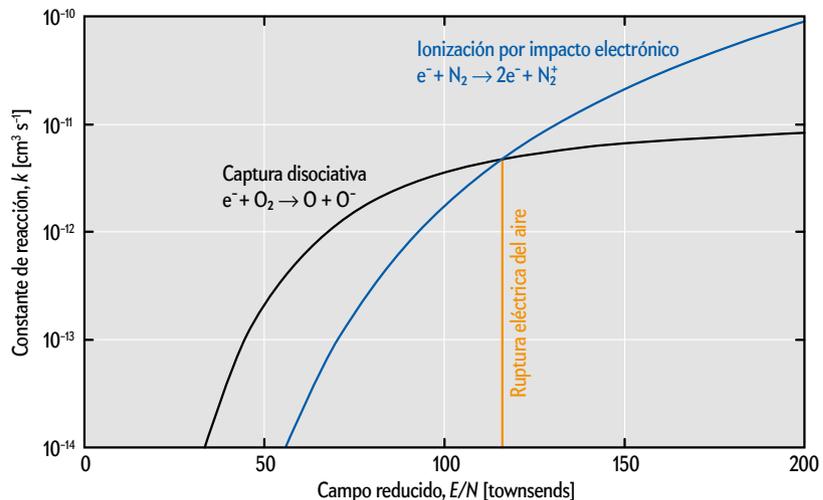
Pero eso no es todo. Nuestro grupo de investigación ha demostrado en fecha reciente que, además de la ionización y la captura disociativa, hay otro mecanismo que también influye en las propiedades eléctricas de la alta atmósfera. Nos referimos al desprendimiento asociativo.

El desprendimiento asociativo es relevante a presiones bajas, como las de la atmósfera terrestre por encima de unos 15 kilómetros de altura. En este proceso, un átomo de oxígeno dotado de carga negativa colisiona con una molécula de nitrógeno, dando lugar a un óxido de nitrógeno y al desprendimiento del electrón inicialmente ligado al ion de oxígeno. Mediante este desprendimiento, los electrones inmovilizados por una captura disociativa del oxígeno atmosférico vuelven a quedar libres. Ello significa que puede producirse una ruptura eléctrica del aire con campos muy inferiores al campo umbral anterior. La única condición es que transcurra el tiempo necesario para que la densidad de iones negativos de oxígeno sea suficiente para compensar las pérdidas de electrones. Como veremos más adelante, este fenómeno podría explicar un tipo particular de duendes, los retardados.

EXCITACIONES, CHOQUES Y EMISIONES

Volviendo a los ELT, ¿qué tipo de radiación emiten y qué procesos microscópicos subyacen a dichas emisiones luminosas? Estas preguntas motivaron los primeros estudios de imagen y espec-

Las principales reacciones que determinan la densidad de electrones libres en el aire y, por tanto, la respuesta eléctrica del mismo son la ionización por impacto electrónico, que libera nuevos electrones, y la captura disociativa, que los inmoviliza. El campo eléctrico (E) por encima del cual domina la ionización y el aire se torna un buen conductor se denomina de ruptura. Puesto que la energía de los electrones libres de la atmósfera es proporcional al cociente entre el campo eléctrico y la densidad de moléculas del aire (N), suele hablarse del campo eléctrico reducido (E/N), expresado en townsendts.



trascopía de duendes llevados a cabo en 1994 y 1995 de forma paralela e independiente por los grupos de Stephen B. Mende, de la Universidad de California en Berkeley, y Davis D. Sentman [véase «Resplandores entre la Tierra y el espacio», por Stephen B. Mende, Davis D. Sentman y Eugene M. Wescott; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1997].

En esas primeras campañas se determinó que las emisiones ópticas procedentes de ELT eran muy breves: desde algunas milésimas de segundo hasta un máximo de 100 milésimas de segundo. Asimismo, se observó que los duendes emitían fugazmente luz roja y azul. Quedaba por descubrir qué mecanismos causaban estos colores así como la razón de su ubicación, rojo arriba y azul abajo.

Además de ionizar moléculas o sufrir capturas disociativas, los electrones libres del aire también pueden chocar con moléculas de nitrógeno y oxígeno, y con ello excitarlas a niveles energéticos superiores. Cuando de forma espontánea se desexcitan, estas emiten radiación cuya longitud de onda depende de la diferencia de energía entre el nivel de origen y el de llegada. Hasta la fecha, los estudios sobre el espectro de emisión de los duendes se han centrado en los intervalos comprendidos entre 320 y 460 nanómetros (ultravioleta cercano y azul) y entre 550 y 820 nanómetros (rojo e infrarrojo cercano). Estas observaciones han demostrado que las emisiones rojas y azul se deben a la desexcitación radiativa de moléculas de nitrógeno.

¿Por qué las emisiones rojas se observan a gran altura y las azules en cotas más bajas? La clave reside en otro fenómeno: la desexcitación colisional. En el tiempo que transcurre desde que un electrón excita a una molécula de nitrógeno hasta que esta emite un fotón, la molécula puede chocar con otra molécula del aire y transformar la energía de su excitación en energía cinética, con lo que no llega a emitir el fotón. La probabilidad de que la excitación de una molécula conduzca a la emisión de un fotón o termine en desexcitación colisional depende de la relación entre la vida media del estado excitado y el tiempo medio entre choques. Este tiempo es inversamente proporcional a la densidad del aire y, por tanto, crece exponencialmente con la altura.

Para facilitar la comprensión de este complejo fenómeno, prescindamos de la arcana notación espectroscópica y llamemos R al nivel que emite en rojo y A al que emite en azul. La energía necesaria para excitar una molécula de nitrógeno hasta el nivel R es menor que la necesaria para llevarla al nivel A. Por ello la excitación hacia R suele ser más frecuente que ha-

cia A. Sin embargo, el estado R presenta una vida media unas 100 veces mayor que A. Por debajo de unos 55 kilómetros, las moléculas excitadas en R sufren tantas colisiones que nunca sobreviven lo suficiente para emitir radiación; las moléculas A, en cambio, sobreviven el tiempo suficiente para radiar. Por eso, aunque a gran altura dominan las emisiones en rojo puesto que las moléculas R son más abundantes que las A (requieren menos energía), por debajo de los 55 kilómetros vemos solo las azules.

Curiosamente, y a diferencia de lo observado en espectros de auroras polares, en los espectros de duendes no se observan líneas asociadas al decaimiento radiativo de átomos de oxígeno ni de nitrógeno excitados por colisiones con electrones libres. En las auroras se observan emisiones en verde (a 557,7 nanómetros) y rojo (a 630,0 y 636,4 nanómetros), procedentes ambas del decaimiento radiativo de átomos de oxígeno que los electrones libres excitan a estados metaestables (estados con una vida media de entre 1 y más de 100 segundos). A las alturas en donde habitan los duendes, estos estados metaestables son desactivados mediante choques con otras moléculas (desexcitación colisional) antes de poder emitir radiación alguna. No pasa así con las auroras porque emiten mucho más arriba, por encima de los 120 kilómetros, donde la presión es muy baja y apenas hay partículas que puedan chocar con los átomos de oxígeno excitados.

PLASMAS Y FILAMENTOS

Hasta ahora hemos descrito el comportamiento del aire bajo la acción de un campo eléctrico externo y homogéneo. Sin embargo, la realidad es más compleja. Es el momento de adentrarnos en la física macroscópica de los ELT, la que describe lo que ocurre a escalas que van desde metros a algunos kilómetros.

Las cargas que, en forma de electrones e iones, libera la ruptura eléctrica del aire responden también al campo eléctrico. Empujadas por este, pueden llegar a acumularse en forma de plasma (se denomina plasma a un conjunto de partículas cargadas que interactúan mediante campos eléctricos o electromagnéticos pero cuya carga neta total es aproximadamente cero). Las descargas eléctricas corresponden a una de las formas de plasma más frecuentes en la naturaleza.

Las propiedades de plasma de muchas descargas eléctricas se manifiestan de forma clara en unas estructuras denominadas dardos (*streamers*). Son los precursores de casi todas las descargas eléctricas a presión elevada y forman los tentáculos que podemos ver en los duendes y otros ELT. Se trata de filamentos

de gas ionizado que se propagan a través de un campo eléctrico menor que el campo de ruptura.

El interior del dardo se comporta como un buen conductor, que responde al campo externo moviendo sus electrones en sentido opuesto al mismo. Así como un conductor altera el campo eléctrico que lo envuelve concentrándolo en sus puntas y salientes, un dardo concentra el campo eléctrico en las proximidades de su extremo. Si esta concentración es suficiente para llevar el campo eléctrico externo a rebasar el campo de ruptura, el aire se ioniza justo en el pequeño volumen frente al extremo, lo que permite que el filamento ionizado crezca. El proceso continúa y el filamento se propaga, de modo que llega a producirse la ruptura del aire incluso en zonas en las que un campo externo por sí solo no bastaría.

La principal propiedad de un dardo es su capacidad de generar campos localizados y de gran intensidad. Ello aporta una gran energía a ciertos electrones, lo que les permite iniciar en un gas frío reacciones químicas que, de otra forma, requerirían temperaturas altísimas. Por ello resultan de gran utilidad en procesos industriales como la limpieza o descontaminación de flujos gaseosos y la iniciación de la combustión. En la naturaleza, los dardos constituyen los precursores de los rayos y los componentes más activos de los duendes.

Los dardos no escapan a la ley de escala según la cual las distancias características de una descarga son inversamente pro-

porcionales a la densidad del aire. A presión atmosférica, un filamento presenta algunos milímetros de diámetro; en la mesosfera, decenas de metros.

A gran altura (entre 70 y 90 kilómetros) se produce otro tipo de descarga eléctrica: la descarga difusa o halo. Esta ocurre cuando falla el mecanismo de focalización del campo eléctrico de los filamentos. Puede ocurrir bien porque el volumen de una descarga no basta para acomodar el diámetro de los filamentos o bien porque, como sucede en las capas más altas de nuestra atmósfera, el aire ya parte de un estado fuertemente ionizado.

En la Tierra, la radiación solar ultravioleta o, durante la noche, la precipitación de partículas energéticas de los rayos cósmicos mantienen una ionización continua en la parte más externa de nuestra atmósfera. A partir de unos 85 kilómetros de altura, esta ionización es suficiente para reflejar las ondas de radio; a la capa atmosférica que se extiende desde esta altura hasta los 600 kilómetros se la denomina ionosfera.

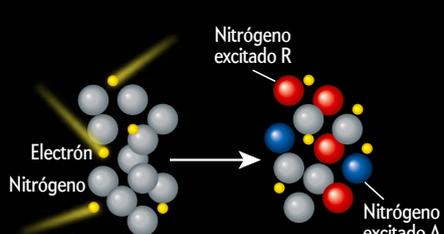
Esa ionización impide la formación de descargas filamentosas. Ello se debe a que la propagación de un dardo requiere una gran diferencia de conductividad entre este y el aire que lo circunda; si el aire ya está ionizado, los campos eléctricos se relajan demasiado rápido para activar el mecanismo de propagación. El resultado puede ser entonces una descarga difusa y mucho más homogénea que un dardo. Halos y dardos consti-

ESPECTROSCOPIA

El porqué de los colores

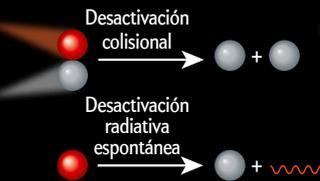
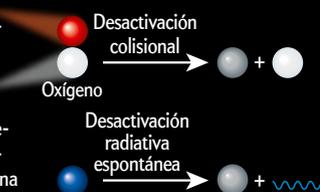
Los duendes presentan dos franjas de colores: arriba, entre los 55 y 90 kilómetros de altura, son rojizos; abajo, entre 40 y 55 kilómetros, azulados. Ambos colores se deben a la relajación radiativa espontánea de moléculas de nitrógeno que previamente han adquirido el estado excitado R (que emite luz roja) o A (que emite luz azul), debido a la colisión con electrones libres. Pero ¿por qué las emisiones rojas se observan a gran altura y las azules en cotas más bajas?

Para responder esa cuestión debemos tener en cuenta otro fenómeno que afecta a las moléculas de nitrógeno: la desexcitación colisional. Además de sufrir desactivación radiativa espontánea, en la que emiten radiación roja (las R) o azul (las A), estas también pueden experimentar una desactivación colisional, al chocar con otras moléculas del aire. Que domine un proceso u otro (desactivación radiativa o colisional) depende de la vida media del estado excitado (lo que determina la probabilidad de desactivación radiativa) y de la altura (lo que determina la densidad del aire y, por tanto, la probabilidad de chocar con otras moléculas). A cotas bajas, solo las moléculas en el estado excitado A, más efímeras, llegan a emitir radiación antes de ser desactivadas por una colisión; por ello predomina la luz azul. A mayor altura, en cambio, donde las colisiones son menos probables, predomina la luz roja debida a la desactivación radiativa de las moléculas R, más abundantes.



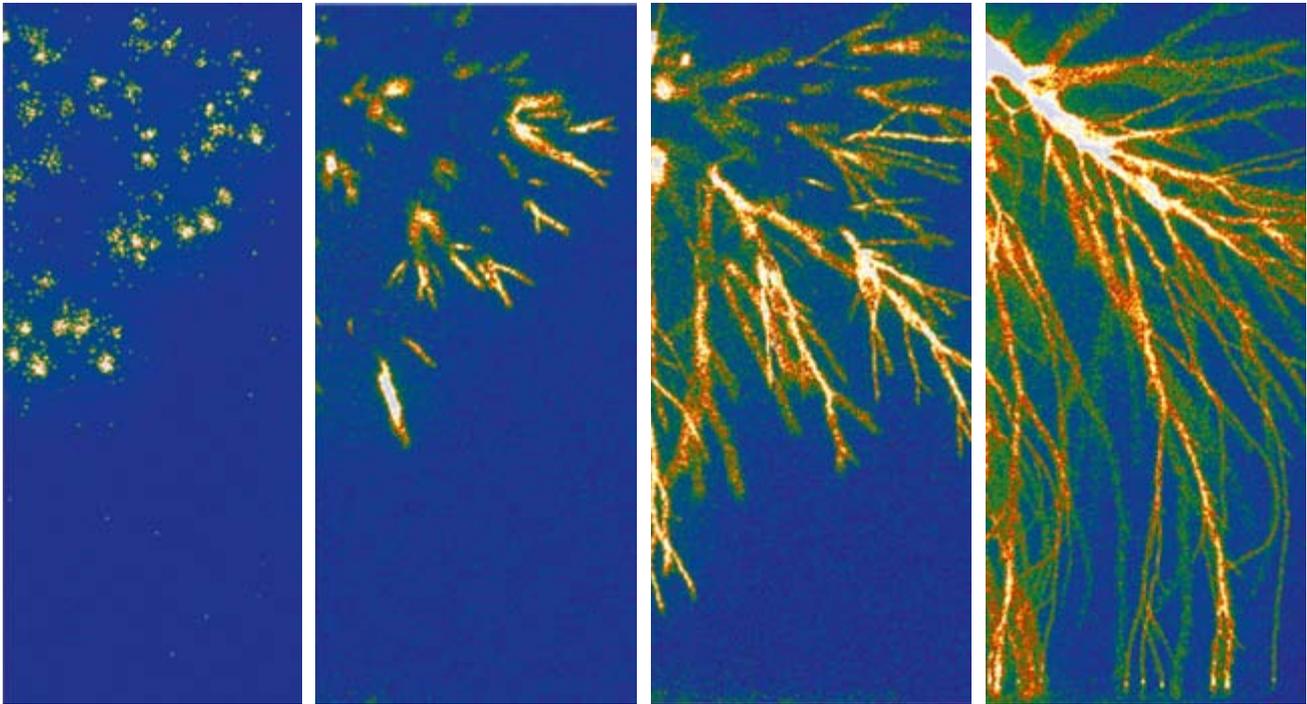
1 Activación por colisión
El choque entre electrones libres y moléculas de nitrógeno causa la excitación de estas hacia el estado R (rojo) o el A (azul). Alcanzar el estado R cuesta menos energía, y por tanto es más probable, que alcanzar el A. Por ello abundan más las moléculas R.

2 Desactivación radiativa o por colisión
A gran altura se producen pocos choques moleculares debido a la baja densidad del aire. Domina, por tanto, la desactivación radiativa con emisión de luz. Al ser más abundantes las moléculas R, predomina la luz roja.
A cotas bajas aumenta la densidad y, por tanto, el número de choques. Las moléculas R sufren desactivación colisional. Las A, más efímeras, experimentan desactivación radiativa antes de chocar. Predomina la luz azul.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Las descargas eléctricas en el aire suelen iniciarse por dardos de gas ionizado (*streamers*). Estos se propagan gracias al intenso campo eléctrico que opera en sus extremos, donde se concentra la energía. Esta secuencia de imágenes (captadas con una cámara rápida) de filamentos generados en un laboratorio muestra que las emisiones ópticas surgen solo de la reducida zona de campo intenso alrededor de los extremos de las ramificaciones. Los fotogramas corresponden, de izquierda a derecha, a tiempos de exposición de 2, 10, 50 y 300 nanosegundos. Los tiempos equivalentes para un duende a 80 kilómetros de altura serían 0,2, 1, 5 y 30 milisegundos. Esta figura ilustra que los filamentos de una descarga eléctrica gaseosa, como los de un duende, son en realidad dardos, en los que solo emite una pequeña región de campo intenso cerca de sus extremos.

tuyen, pues, los mecanismos principales que dan cuerpo a las descargas eléctricas en la alta atmósfera.

EL ZOO DE LOS ELT

Una vez descrita la anatomía de los ELT, centrémonos ahora en su taxonomía. Comenzamos por los duendes que observaron Winckler y sus colaboradores. Se trata de la «especie» más frecuente de ELT. Corresponden a descargas filamentosas extremadamente luminosas que se extienden en alturas de entre 50 y 85 kilómetros. Presentan un diámetro de algunas decenas de kilómetros y duran centésimas de segundo.

Los duendes surgen siempre del campo eléctrico producido por un rayo en la troposfera, la capa más baja de la atmósfera, que se extiende hasta los 15 kilómetros de altura. Pero no todos los rayos engendran duendes. El 90 por ciento de las descargas entre una nube y el suelo corresponden a rayos negativos (transportan una carga negativa de la nube a la tierra). En cambio, casi todos los duendes observados hasta la fecha han sido producidos por rayos positivos (que transportan carga positiva). El duende suele producirse solo algunos milisegundos después del rayo. Sin embargo, en numerosas ocasiones se han observado duendes iniciados cientos de milisegundos después: nos referimos a los duendes retardados.

La diferencia entre duendes rápidos y duendes retardados estriba en la dinámica microscópica de la que hemos hablado antes. Recordemos que la generación y pérdida de electrones libres en un plasma de aire está dominada por dos fenómenos: la ionización y la captura disociativa. Si consideramos solo es-

tos dos procesos, la ruptura eléctrica se produce por encima de 120 townsendts (cuando se generan más electrones que los que se pierden). Pero si entra en escena un tercer actor, el desprendimiento asociativo, el balance se altera. Este proceso puede llegar a inducir una ruptura con campos inferiores al umbral, siempre que transcurra el tiempo necesario para que se acumule una densidad suficiente de iones negativos de oxígeno.

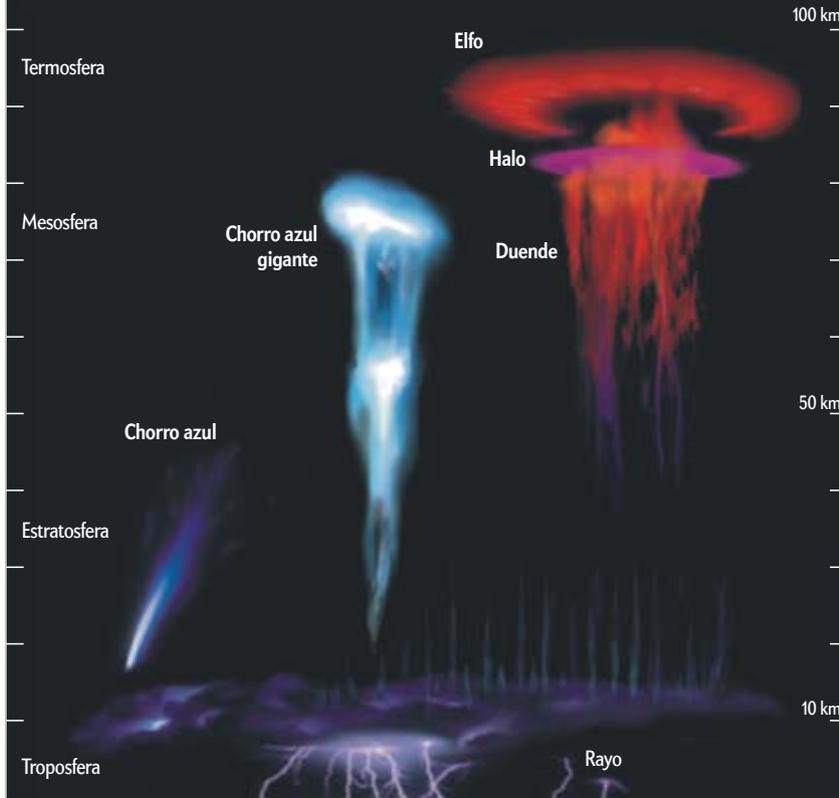
A la altura de los duendes, ese tiempo es del orden de decenas de milisegundos, precisamente lo que suele necesitar un duende retardado para iniciarse. Ello nos ha llevado a sugerir en un trabajo reciente que el desprendimiento asociativo constituye la clave para entender los duendes retardados. A raíz de nuestra propuesta, T. Neubert, del Instituto Danés de Ciencias del Espacio, N. Liu, de la Universidad de Florida, y R. Marshall, de la Universidad de Stanford, han empezado a estudiar el efecto del desprendimiento asociativo en la microfísica de otros ELT.

Amén de los rápidos y los retardados, existen también los duendes columniformes (*C-sprites*) y los de tipo «zanahoria». Los columniformes están formados por un número reducido de filamentos (menos de diez) que se propagan verticalmente en paralelo y que parecen no interactuar entre sí. Los de tipo zanahoria, en cambio, constan de centenares o tal vez miles de filamentos que se propagan tanto hacia arriba como hacia abajo con una importante componente horizontal debido a la repulsión electrostática entre ellos —de ahí la forma de zanahoria que les da nombre.

Los duendes esconden también subestructuras llamativas. Una de ellas corresponde a los persistentes puntos brillantes que

Una familia luminosa

En la región de la atmósfera entre las nubes de tormenta y la ionosfera conviven, junto a los duendes, una gran variedad de fenómenos eléctricos luminosos.



jalonan el recorrido de un filamento. Por su semejanza con los abalorios ensartados en un collar, se denominan cuentas (*beads*). En 2011 publicamos un artículo en *Geophysical Research Letters* en el que proponíamos que las cuentas de un duende pueden hacer manifiestas las inhomogeneidades en la densidad o en la concentración de electrones de la alta atmósfera, hasta ahora difíciles de observar. Los duendes cobrarían, pues, un interés adicional, puesto que podrían considerarse sondas naturales que escudriñan las escalas espaciotemporales más pequeñas de la física mesosférica.

Fijémonos ahora en los halos, las descargas difusas de la mesosfera. Enormes destellos entre los 80 y los 90 kilómetros de altura, con diámetros de unos 100 kilómetros y forma de cuenco, los halos duran entre uno y dos milisegundos. Pueden aparecer solos o junto a un duende. Dado que en una descarga difusa no actúan los mecanismos de focalización de un campo eléctrico, los campos máximos alcanzados en un halo son muy inferiores a los de un duende. En consecuencia, las intensidades luminosas también son menores.

Otro miembro de esta familia de fenómenos luminosos corresponde a los chorros azules (*blue jets*). Desde comienzos del siglo XX existen testimonios de la observación de alargadas columnas de intenso color azul elevándose por encima de nubes de tormenta. Sin embargo, hasta el verano de 1994 no se realizaron, en Arkansas, las primeras fotografías detalladas y videos de intensas descargas eléctricas que emitían destellos

azules muy brillantes en forma de chorro procedentes de las partes altas (entre 15 y 18 kilómetros) de nubes de tormenta con un gran aparato eléctrico asociado. Estas descargas eléctricas ascendentes avanzan a unos 100 kilómetros por segundo y se caracterizan por unas emisiones de color azulado y cian que duran unos 200 milisegundos. Pueden llegar hasta los 45 kilómetros de altura y comienzan en la parte alta de nubes de tormenta de las que surgen abundantes rayos, sobre todo negativos.

Las teorías actuales describen los surtidores azules como descargas eléctricas de tipo dardo positivo, esto es, con una concentración de carga eléctrica positiva en el frente o cabeza. En 1995 se publicaron los primeros estudios sobre chorros azules y en 1996 el primer trabajo sobre los iniciadores azules (*blue starters*), la primera fase de los chorros azules (se propagan solo hasta unos 25 kilómetros de altura). En 2002 se amplió la familia: se detectaron los chorros azules gigantes; estos emergen a entre 10 y 20 kilómetros de altura pero pueden llegar a alcanzar la baja ionosfera a unos 90 kilómetros, es decir, que pueden llegar a conectar la troposfera con la baja ionosfera terrestre. Al contrario que los chorros azules estándar, los surtidores gigantes parecen transportar carga negativa hacia la ionosfera.

El canal más rápido por el que la energía de los rayos troposféricos se transfiere a la alta mesosfera y baja ionosfera corresponde a los pulsos electromagnéticos procedentes de la corriente generada por los rayos. A estos pulsos se deben otro de los eventos luminosos transitorios que ocupan este artículo: los elfos o *elves*, acrónimo de *emissions of light and VLF (very low frequency) perturbations due to EMP (electromagnetic pulses) sources*. Aunque predichos en 1991, no fueron detectados y fotografiados hasta 1996. Los elfos suelen aparecer en forma de resplandor de luz difusa muy poco después del rayo al que están asociados y justo antes de que aparezcan los duendes. Presentan el aspecto de un toroide o rosquilla situado a entre 85 y 95 kilómetros de altura con una anchura vertical inferior a 10 kilómetros y un diámetro de entre 150 y 450 kilómetros.

Los elfos no corresponden, por tanto, a descargas eléctricas, sino a pulsos electromagnéticos que, además de producir unas fugaces emisiones ópticas de apenas 1 milisegundo de duración, también calientan e ionizan la alta mesosfera y baja ionosfera terrestre, lo que puede alterar las propiedades químicas y eléctricas de las mismas.

¿Qué sabemos del espectro de emisión de estos nuevos ELT? ¿Emiten en otros rangos además del visible? Las señales (bandas) correspondientes al nitrógeno molecular en los espectros de duendes y halos corresponden al ultravioleta cercano (entre 300 y 400 nanómetros) y al infrarrojo cercano (hasta 1500 nanómetros). Sin embargo, hasta la fecha solo se ha explorado el espectro de los duendes hasta los 880 nanómetros.

Estudios recientes indican que la parte central de los duendes emite en el infrarrojo cercano mientras que las zonas superior e inferior lo hacen en el visible. También se ha observado que los espectros de duendes, halos y cuentas son prácticamente iguales en el visible; en cambio, se han predicho diferencias notables en el ultravioleta y el infrarrojo cercano (regiones espectrales en donde se ponen de manifiesto los diferentes campos eléctricos que producen estos tres tipos de ELT). Las simulaciones teóricas también sugieren que los duendes y halos emiten en el ultravioleta de vacío (UVV) entre 150 y 250 nanómetros (sin embargo, ello solo podría detectarse desde el espacio, debido a la enorme opacidad de la atmósfera en esas longitudes de onda). Poco se conoce sobre las emisiones ópticas de los chorros azules o los chorros azules gigantes ya que no existen registros espectroscópicos de estos ELT; solo se sabe que la luz que emiten es azulada.

EFECTOS PLANETARIOS

La última parada en nuestro recorrido por las escalas de la física de los ELT es la que abarca miles de kilómetros y engloba la Tierra entera. Las descargas en la alta atmósfera desempeñan una función relevante en fenómenos a escala planetaria como el circuito eléctrico global, la circulación de corriente entre la superficie terrestre y la ionosfera.

En la Tierra, las nubes de una tormenta eléctrica operan a modo de «batería». A través de mecanismos microscópicos que involucran la presencia de hielo, agua y vapor, estas transforman (mediante la separación de cargas en su interior) parte de la energía mecánica de la atmósfera en energía electrostática. En general, las capas inferiores de las nubes adquieren carga negativa y las superiores positiva (ello explica que el 90 por ciento de las descargas nube-tierra presenten polaridad negativa). Puesto que las gotas de lluvia transportan hacia el suelo una (ligera) carga también negativa, las tormentas confieren carga negativa al suelo.

Al ser la Tierra un buen conductor eléctrico, esta carga viaja rápidamente a otras zonas de la superficie del planeta. Lejos de la tormenta, en las áreas despejadas, la tierra se descarga mediante una corriente continua de unos 2×10^{-12} amperios por centímetro cuadrado que conecta la superficie con la ionosfera. Aunque el aire es un mal conductor, la presencia de iones pesados y aerosoles cerca de la superficie basta para mantener esta leve corriente.

El segmento que falta para cerrar el circuito eléctrico es el que une la ionosfera con la parte superior de las nubes. Justo en este espacio habitan los ELT. Cabe resaltar que aunque la luminosidad de una descarga en la alta atmósfera dura como máximo algunas centésimas de segundo, sus efectos, en especial sobre la conductividad del aire, pueden ser mucho más persistentes. Cuantificar el efecto de los ELT sobre el circuito eléctrico global constituye uno de los retos actuales en este campo de investigación. La observación de descargas extensas como los chorros gigantes, que unen las nubes con la ionosfera, sugiere que los ELT desempeñan una función relevante en las propiedades eléctricas de la atmósfera terrestre. Los chorros azules gigantes transfieren una importante carga negativa (alrededor de -150 culombios) del suelo a la baja ionosfera. Por tanto, los chorros azules (dardos positivos) contribuirían a cargar el circuito eléctrico global mientras que los chorros azules gigantes (dardos negativos) lo descargarían.

Los ELT afectan también a la química atmosférica. Los procesos subyacentes a estos eventos, como la ionización por im-

Las escalas de un duende

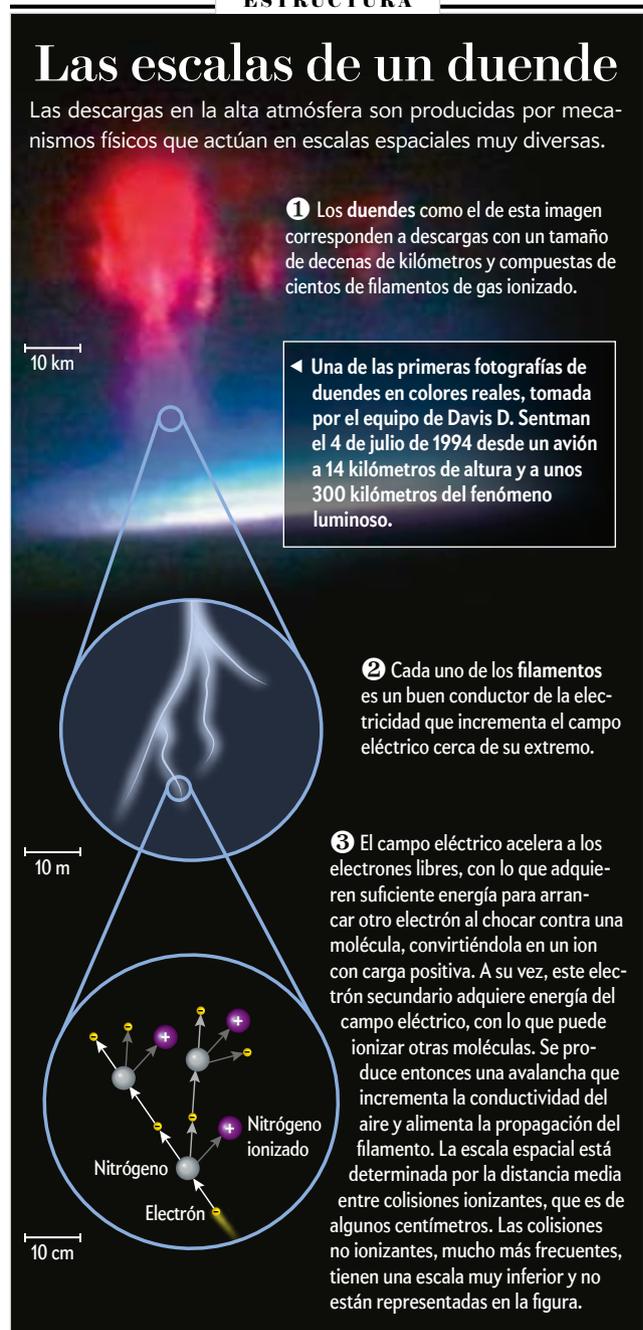
Las descargas en la alta atmósfera son producidas por mecanismos físicos que actúan en escalas espaciales muy diversas.

1 Los duendes como el de esta imagen corresponden a descargas con un tamaño de decenas de kilómetros y compuestas de cientos de filamentos de gas ionizado.

2 Una de las primeras fotografías de duendes en colores reales, tomada por el equipo de Davis D. Sentman el 4 de julio de 1994 desde un avión a 14 kilómetros de altura y a unos 300 kilómetros del fenómeno luminoso.

3 Cada uno de los filamentos es un buen conductor de la electricidad que incrementa el campo eléctrico cerca de su extremo.

El campo eléctrico acelera a los electrones libres, con lo que adquieren suficiente energía para arrancar otro electrón al chocar contra una molécula, convirtiéndola en un ion con carga positiva. A su vez, este electrón secundario adquiere energía del campo eléctrico, con lo que puede ionizar otras moléculas. Se produce entonces una avalancha que incrementa la conductividad del aire y alimenta la propagación del filamento. La escala espacial está determinada por la distancia media entre colisiones ionizantes, que es de algunos centímetros. Las colisiones no ionizantes, mucho más frecuentes, tienen una escala muy inferior y no están representadas en la figura.



pacto electrónico y el desprendimiento asociativo, alteran el número de electrones e iones libres en el aire. Ello no afecta solo a la conductividad eléctrica de la atmósfera, sino también a su composición química: esos iones y, sobre todo, electrones contribuyen a la formación de átomos y moléculas excitados que, a su vez, participan en reacciones químicas que acaban modificando las concentraciones en la alta atmósfera de especies como los óxidos de nitrógeno (en especial el NO y N₂O), que desempeñan un papel destacado en la formación del ozono atmosférico.

Si bien los modelos teóricos indican que los ELT alteran la composición química de la atmósfera que los circunda, ello aún no se ha comprobado experimentalmente. Varias misiones internacionales incluyen esta cuestión entre sus objetivos. Entre ellos el proyecto COBRAT de globos estratosféricos del Centro

Nacional de Estudios Espaciales francés (CNES), con importante colaboración española. También se están desarrollando refinados modelos cinéticos para estudiar el impacto químico de los ELT a escala global. En paralelo, existen esfuerzos internacionales encaminados a detectar desde diversas plataformas, como la Estación Espacial Internacional y diversos satélites que se lanzarán en los próximos años, las emisiones ópticas asociadas a las especies químicas afectadas por la presencia de ELT en la atmósfera terrestre.

EL FUTURO

Desde aquella noche de verano en la que el equipo de Winckler observó los primeros duendes hemos aprendido mucho. Ahora conocemos la existencia de fenómenos en la alta atmósfera mucho más variados y complejos de lo que anticipaba el sencillo razonamiento de visionarios como C. T. R. Wilson, que ya en 1925 se anticipó al descubrimiento de las descargas eléctricas en la alta atmósfera y propuso un mecanismo para las mismas que aún hoy se considera fundamentalmente correcto [véase «El rayo», por Joseph R. Dwyer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2005]. La comprensión de la electricidad atmosférica se extiende mucho más allá del estudio de los rayos. Comenzamos a intuir la gran riqueza de procesos físicos y químicos que esconden en la alta atmósfera terrestre.

Prueba de la explosión en el interés que los ELT han despertado en la comunidad científica es la cantidad de proyectos previstos para explorarlos. La misión ASIM (*Atmospheric Space Interaction Monitor*) de la Agencia Espacial Europea, con participación española del CSIC, el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y las universidades Politécnica de Catalu-

ña (UPC), de Valencia (UV) y Rey Juan Carlos (URJC), instalará un módulo de observación de ELT en la Estación Espacial Internacional a partir de 2015. Allí acompañará a la misión japonesa JEM-GLIMS, con objetivos parecidos. La agencia espacial rusa lanzó en mayo de 2012 el microsatélite CHIBIS. La agencia espacial francesa lanzará en 2015 el microsatélite TARANIS, cuyas observaciones serán complementadas por globos estratosféricos del programa COBRAT.

Otra de las grandes cuestiones que ocupará a los expertos durante las próximas décadas es la posible existencia de ELT en otros planetas del sistema solar. Sabemos que existe actividad eléctrica en Venus, Júpiter y Saturno; es posible, por tanto, que esta electricidad se refleje en emisiones en las capas más altas de sus atmósferas.

Los próximos veinte años de estudio sobre electricidad en la alta atmósfera se presentan cargados de desafíos y de la esperanza de nuevos hallazgos sorprendentes. Los investigadores de este campo estamos preparados para otros años tan fértiles y apasionantes como los veinte anteriores.

PARA SABER MÁS

Physics and chemistry of the upper atmosphere. M. H. Rees. Cambridge University Press, 1989.

Gas discharge physics. Yu. P. Raizer. Springer Verlag, 1991.

Lightning: physics and effects. V. A. Rakov y M. A. Uman. Cambridge University Press, 2003. Review of recent results on streamer discharges and their relevance for sprites and lightning. U. Ebert et al. en *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, A00E43, 2010.

Mesospheric electric breakdown and delayed sprite ignition caused by electron detachment. A. Luque y F. J. Gordillo Vázquez en *Nature Geoscience*, vol. 5, págs. 22-25, enero de 2012.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

OFERTA DE SUSCRIPCIÓN

Reciba puntual y cómodamente los ejemplares en su domicilio

Suscríbase a *Investigación y Ciencia*...

- ▶ por **1 año** y consiga un **17% de descuento** sobre el precio de portada (**65 €** en lugar de 78 €)
- ▶ por **2 años** y obtenga un **23% de descuento** sobre el precio de portada (**120 €** en lugar de 156 €)
- ▶ **REGALO** de 2 ejemplares de la colección TEMAS a elegir.*

Y además podrá acceder de forma gratuita a la versión digital de los números correspondientes a su período de suscripción.

Puede suscribirse mediante:

El cupón que se inserta en este número ◀

www.investigacionyciencia.es ◀

Teléfono: 934 143 344 ◀

* Consulte el catálogo. Precios para España.