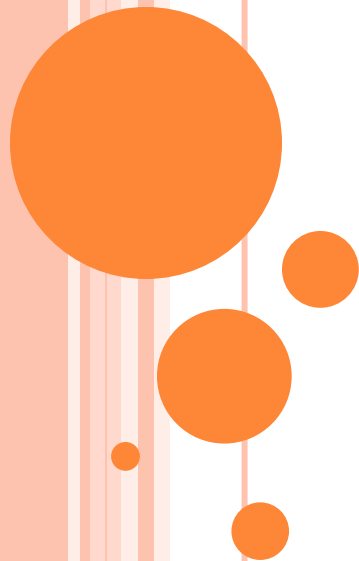


11

# Electricidad atmosférica

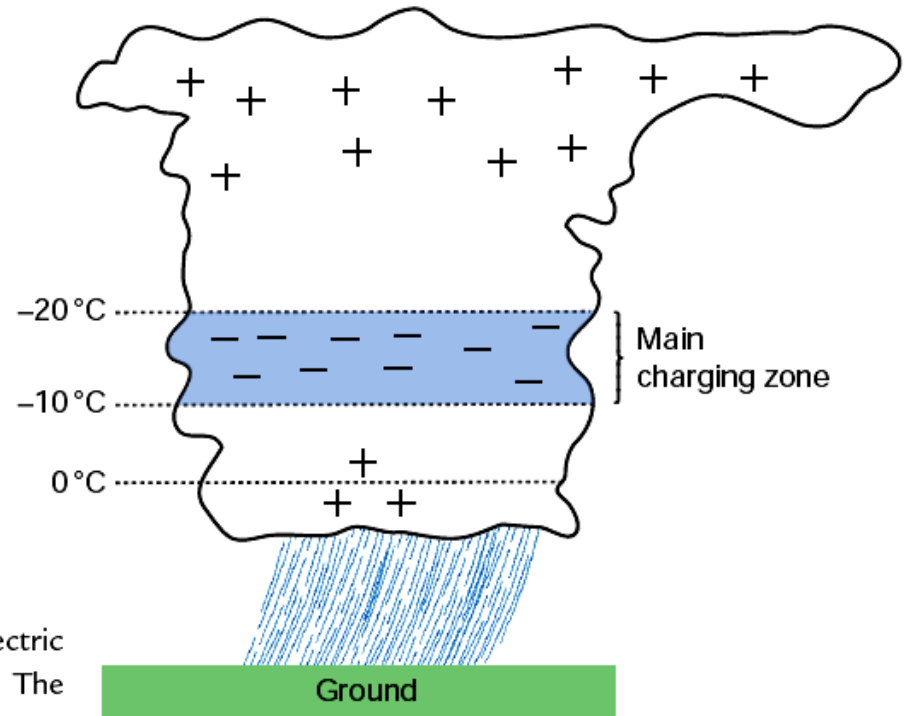


Nos ocuparemos de los mecanismos microfísicos que se cree son responsables de la electrificación de tormentas eléctricas y de la naturaleza de relámpagos y truenos.

## Generación de cargas

Todas las nubes están electrificadas en algún grado. Sin embargo, en nubes convectivas vigorosas suficiente carga eléctrica se separa para producir campos eléctricos que exceden la ruptura dieléctrica del aire nuboso ( $\sim 1 \text{ MVm}^{-1}$ ), resultando en una descarga inicial intranube (es decir, entre dos puntos de la misma nube) del rayo.

La distribución de las cargas en las tormentas ha sido investigada con radiosondas especiales, mediante la medición de los cambios en el campo eléctrico que acompañan a los relámpagos a nivel del suelo, y con aviones instrumentados. Un resumen simple se muestra en la Fig. 6.52.



**Fig. 6.52** Schematic showing the distribution of electric charges in a typical and relatively simple thunderstorm. The lower and smaller positive charge is not always present.

Las magnitudes de la carga negativa inferior y la carga positiva superior son  $\sim 10$ - $100$  C, o unos pocos  $\text{nC m}^{-3}$ . La ubicación de la carga negativa (llamada la *zona principal de carga*) está bastante bien definida entre los niveles de temperatura de  $-10$  y  $-20$  °C. La carga positiva se distribuye en una región más difusa por encima de la carga negativa. Aunque ha habido algunos informes de relámpagos en nubes cálidas, la gran mayoría se produce en nubes frías.

Un resultado de observación importante, que proporciona la base para la mayoría de las teorías de la electrificación de tormentas, es que al inicio de una electrificación fuerte le sigue la ocurrencia (detectada por el radar) de precipitación fuerte dentro de la nube en forma de nieve granulada o granizo. La mayoría de las teorías asumen que a medida que una partícula de nieve granulada o granizo (*rimer*) cae a través de una nube se carga negativamente debido a las colisiones con las pequeñas partículas de la nube (o gotitas de hielo), dando lugar a la carga negativa en la zona de carga principal. La carga positiva correspondiente es impartida a las partículas de la nube cuando rebotan con el rimer, y son entonces transportadas por las corrientes ascendentes a las regiones superiores de la nube.

Las condiciones exactas y el mecanismo por el cual un rimer podría quedar con carga negativa, mientras las partículas más pequeñas de la nube con carga positiva, han sido objeto de debate desde hace unos cien años. Se han propuesto muchos mecanismos potencialmente prometedores, pero posteriormente demostraron ser incapaces de explicar la tasa observada de generación de carga en las tormentas o, por otras razones, resultaron insostenibles.

***Ejercicio 6.6.** La tasa de generación de carga en una tormenta es  $\sim 1 \text{ C km}^{-3} \text{ min}^{-1}$ . Determinar la carga eléctrica que tendría que ser separada en cada colisión de un cristal de hielo con un rimer (por ejemplo, una partícula de graupel) para explicar esta tasa de generación de carga. Suponga que la concentración de los cristales de hielo es de  $10^5 \text{ m}^{-3}$ , su velocidad de caída es insignificante en comparación con la de la del rimer, los cristales de hielo no están cargados antes de chocar con el rimer, su eficiencia de colisión con el rimer es la unidad, y todos los cristales de hielo rebotan con el rimer. Supóngase también que los rimers son esferas con radio de 2 mm, la densidad de un rimer es de  $500 \text{ kg m}^{-3}$  y la tasa de precipitación debida a los rimers es de 5 cm por hora de agua equivalente.*

Ahora vamos a describir brevemente un mecanismo propuesto para la transferencia de carga entre un rimer y un cristal de hielo en colisión que parece prometedor, aunque queda por ver si puede pasar la prueba del tiempo.

Experimentos de laboratorio muestran que la carga eléctrica se separa cuando las partículas de hielo colisionan y rebotan. La magnitud de la carga es típicamente de aproximadamente 10 fC por colisión, que, como hemos visto en el Ejercicio 6.6, sería suficiente para explicar la tasa de generación de carga en las tormentas. El signo de la carga recibida por el rimer depende de la temperatura, del contenido de agua líquida de la nube, y de las tasas relativas de crecimiento a partir de la fase de vapor del rimer y de los cristales de hielo. Si el rimer crece más lentamente por deposición de vapor que los cristales de hielo, el rimer recibe carga negativa y los cristales de hielo reciben la carga positiva correspondiente. Debido a que el calor latente liberado por la congelación de gotitas superenfriadas en un rimer a medida que cae a través de la nube elevará la temperatura de la superficie del rimer por encima de la temperatura ambiente, la tasa de crecimiento del rimer por deposición de vapor será menor que la de los cristales de hielo en la nube. En consecuencia, cuando un cristal de hielo choque con un rimer, el rimer debe recibir una carga negativa y el cristal de hielo una carga positiva, como se requiere para explicar la principal distribución de cargas en una tormenta eléctrica.

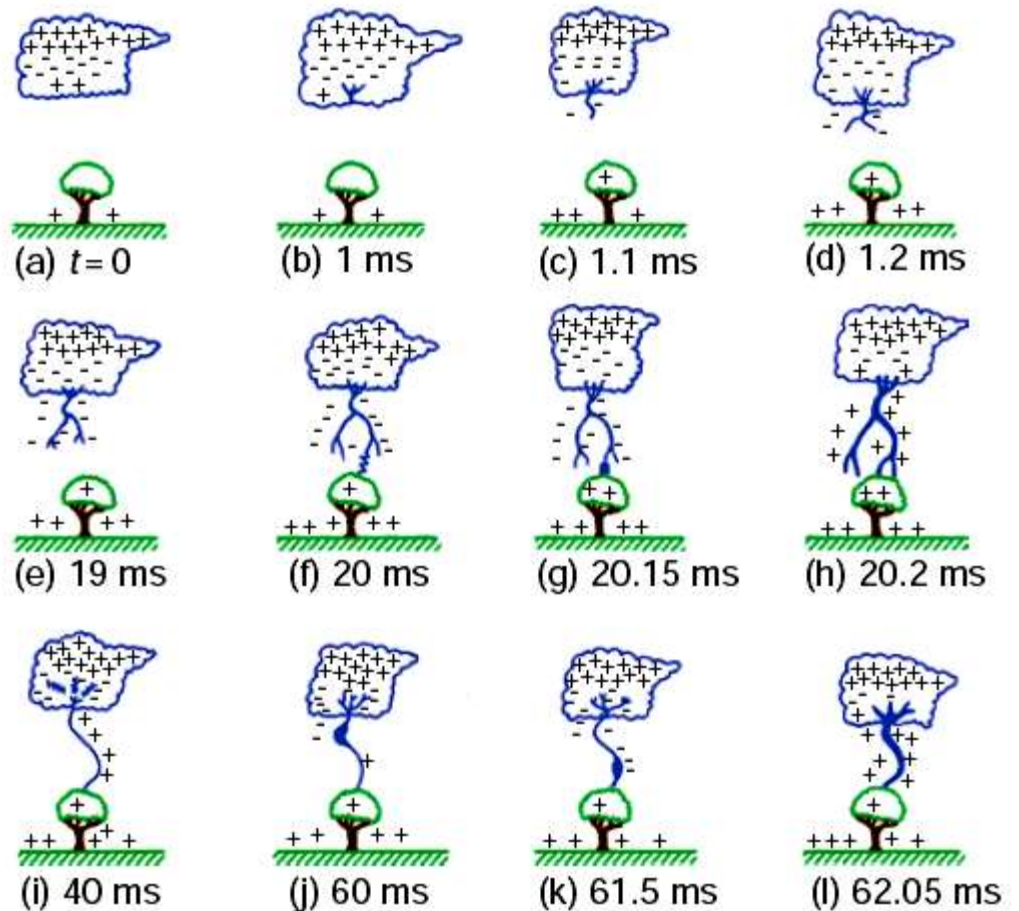
La transferencia de carga parece deberse al hecho de que los iones positivos se mueven a través del hielo mucho más rápido que los iones negativos. Como nueva superficie de hielo es creada por deposición de vapor, los iones positivos migran rápidamente hacia el interior del hielo, dejando la superficie cargada negativamente. Durante una colisión se mezcla material de cada partícula, pero se transfiere carga negativa a la partícula con menor tasa de crecimiento.

En algunas tormentas eléctricas, se observa una carga positiva relativamente débil justo debajo de la zona de carga principal (Fig. 6.52). Esto puede estar asociado a la carga de la precipitación sólida durante la fusión o a procesos de mezcla de fases.

## Rayos y truenos

A medida que las cargas eléctricas se separan en una nube, la intensidad del campo eléctrico aumenta y finalmente supera la que el aire puede sostener. La ruptura dieléctrica resultante toma la forma de un rayo que puede ser o bien (1) dentro de la propia nube, entre las nubes, o desde la nube hacia el aire (que llamaremos *relámpago nuboso*) o (2) entre la nube y la tierra (un *rayo a tierra*).

Los rayos que cargan negativamente el suelo se originan desde el centro principal de carga negativa en forma de una descarga, llamado el *líder escalonado*, que se mueve hacia abajo, hacia la Tierra, en pasos discretos. Cada etapa tiene una duración de aproximadamente  $1 \mu\text{s}$ , tiempo durante el cual el líder escalonado avanza unos 50 m; el intervalo de tiempo entre los pasos es de unos  $50 \mu\text{s}$ . Se cree que el líder escalonado se inicia por una descarga local entre la pequeña bolsa de carga positiva en la base de una nube de tormenta y la parte inferior de la región cargada negativamente. (Fig. 6.53b)



**Fig. 6.53** Schematics (not drawn to scale) to illustrate some of the processes leading to a ground flash that charges the ground negatively. (a) cloud charge distribution, (b) preliminary breakdown, (c–e) stepped leader, (f) attachment process, (g and h) first return stroke, (i) K and J processes, (j and k) the dart leader, and (l) the second return stroke. [Adapted from M. Uman, *The Lightning Discharge*, Academic Press, Inc., New York, 1987, p. 12, Copyright 1987, with permission from Elsevier.]

Esta descarga libera electrones que estaban conectados previamente a las partículas de precipitación en la región cargada negativamente. Estos electrones libres neutralizan el pequeño paquete de carga positiva que puede estar presente por debajo de la zona de carga principal (Fig. 6.53c) y luego se mueven hacia el suelo (Fig. 6.53c-e). A medida que el líder escalonado con carga negativa se acerca al suelo, se inducen cargas positivas en el terreno, especialmente en los objetos que sobresalen, y cuando se encuentra a 10-100 m del suelo, una descarga se mueve hacia arriba desde el suelo a su encuentro (Fig. 6.53f). Después del contacto entre el líder escalonado y la descarga que conecta hacia arriba, un gran número de electrones fluyen hacia el suelo y un rayo de alta luminosidad y visible se propaga hacia arriba en forma continua desde el suelo a la nube a lo largo de la trayectoria seguida por el líder escalonado (Fig. 6.53g y 6.53h). Este flujo de electrones (llamado *carrera de retorno*) es responsable del canal de luz brillante que se observa como rayo. Debido a que la carrera se mueve hacia arriba tan rápidamente (en unos 100  $\mu$ s), todo el canal de la carrera de retorno aparece al ojo iluminado simultáneamente. Luego del flujo descendente de electrones, tanto la carrera de retorno como el suelo, al que está vinculado, permanecen cargados positivamente en respuesta al remanente de carga negativa en la zona principal de carga.



Después de la primera carrera, que normalmente lleva la corriente más grande (en promedio 30.000 A), carreras posteriores pueden ocurrir a lo largo del mismo canal principal, a condición de que electrones adicionales se suministren en la parte superior de la carrera anterior dentro de aproximadamente 0,1 s del cese de la corriente. Los electrones adicionales se suministran al canal por las llamadas *serpentinias K* o *J*, que conectan la parte superior de la carrera anterior con regiones progresivamente más distantes de la zona de carga negativa de la nube (Fig. 6.53i). Un líder con carga negativa, llamado el *líder de flecha*, se mueve luego de forma continua hacia la Tierra a lo largo del camino principal del canal de la primer carrera y deposita electrones adicionales en el suelo (Fig. 6.53j y 6.53k). El líder de flecha es seguido por otra carrera de retorno visible hacia la nube (Fig. 6.53l).

El primer golpe de un rayo en general, tiene muchas ramas dirigidas hacia abajo (figura 6.54a.), ya que el líder escalonado está fuertemente ramificado; golpes posteriores suelen no mostrar ninguna ramificación, porque siguen sólo el canal principal del primer rayo.



**Fig. 6.54** (a) A time exposure of a ground lightning flash that was initiated by a stepped leader that propagated from the cloud to the ground. Note the downward-directed branches that were produced by the multibranched stepped leader. [Photograph courtesy of NOAA/NSSL.] (b) A time exposure of a lightning flash from a tower on a mountain to a cloud above the tower. This flash was initiated by a stepped leader that started from the tower and propagated upward to the cloud. In contrast to (a), note the upward-directed branching in (b). [Photograph courtesy of R. E. Orville.]

La mayoría de los relámpagos contienen tres o cuatro golpes, separados en el tiempo por aproximadamente 50 ms, que pueden eliminar 20 C o más de carga de la región inferior de una nube de tormenta. Los mecanismos de generación de cargas dentro de la nube deben a continuación renovar la carga antes de que ocurra otro rayo. Esto se puede hacer en tan poco tiempo como 10 s.

En contraste con los rayos descritos anteriormente, la mayoría de los rayos a cimas de montañas y edificios altos son iniciadas por líderes escalonados que comienzan cerca de la parte superior del edificio, se mueven hacia arriba, y se ramifican hacia la base de una nube (Fig. 6.54b). Los pararrayos protegen estructuras altas de daños mediante el enrutamiento de las descargas hacia el suelo a través de un cable y una varilla conductora enterrada, en lugar de a través de la estructura misma.

Una descarga de un relámpago dentro de una nube neutraliza generalmente los principales centros de carga positiva y negativa. En lugar de consistir en varios movimientos discretos, tal descarga generalmente consiste en una sola chispa o líder que se mueve lentamente y viaja entre las regiones cargadas positiva y negativamente en unas pocas décimas de segundo. Esta corriente produce una luminosidad baja pero continua en la nube sobre la que se pueden superponer varios pulsos más brillantes, con una duración de alrededor de 1 ms. Las tormentas tropicales producen alrededor de 10 descargas de nube por cada descarga a tierra, pero en latitudes templadas las frecuencias de ambos tipos de descarga son similares.

La carrera de retorno de un rayo eleva la temperatura del canal de aire a través del cual pasa por encima de 30.000 K en un corto período de tiempo, de modo que el aire no tiene tiempo para expandirse. Por lo tanto, la presión aumenta en el canal casi instantáneamente en 10-100 atm. El canal de alta presión se expande rápidamente en el aire circundante y crea una muy potente onda de choque (que viaja más rápido que la velocidad del sonido) y, más allá, una onda de sonido que se escucha como *trueno*. El trueno también es producido por los líderes escalonado y de flecha, pero es mucho más débil que el de las carreras de retorno. El trueno en general, no se puede escuchar a más de 25 km de una descarga de rayo. A distancias mayores el trueno pasa por encima de la cabeza del observador, ya que generalmente se refracta hacia arriba debido a la disminución de la temperatura con la altura.

Aunque la mayoría de los rayos a tierra llevan carga negativa al suelo, alrededor del 10% de los rayos en tormentas de latitudes medias llevan carga positiva al suelo. Por otra parte, estos rayos llevan las mayores corrientes y transferencias de carga. Tales rayos podrían originarse debido al desplazamiento horizontal de carga positiva en las regiones superiores de una tormenta eléctrica por la cortante del viento (como se muestra en la Fig. 6.52) o, en algunos casos, debido a que los principales centros de carga en la tormenta eléctrica estén invertidos.

## El circuito eléctrico global

Por debajo de una altura de unas pocas decenas de kilómetros hay un campo eléctrico dirigido hacia abajo en la atmósfera durante los períodos de buen tiempo. Por encima de esta capa de campo eléctrico relativamente fuerte hay una capa llamada la *electrosfera*, extendiéndose hacia arriba hasta la parte superior de la ionosfera, donde la conductividad eléctrica es tan alta que está esencialmente a potencial eléctrico constante. Debido a que la electrosfera es un buen conductor eléctrico, sirve como un escudo electrostático casi perfecto.

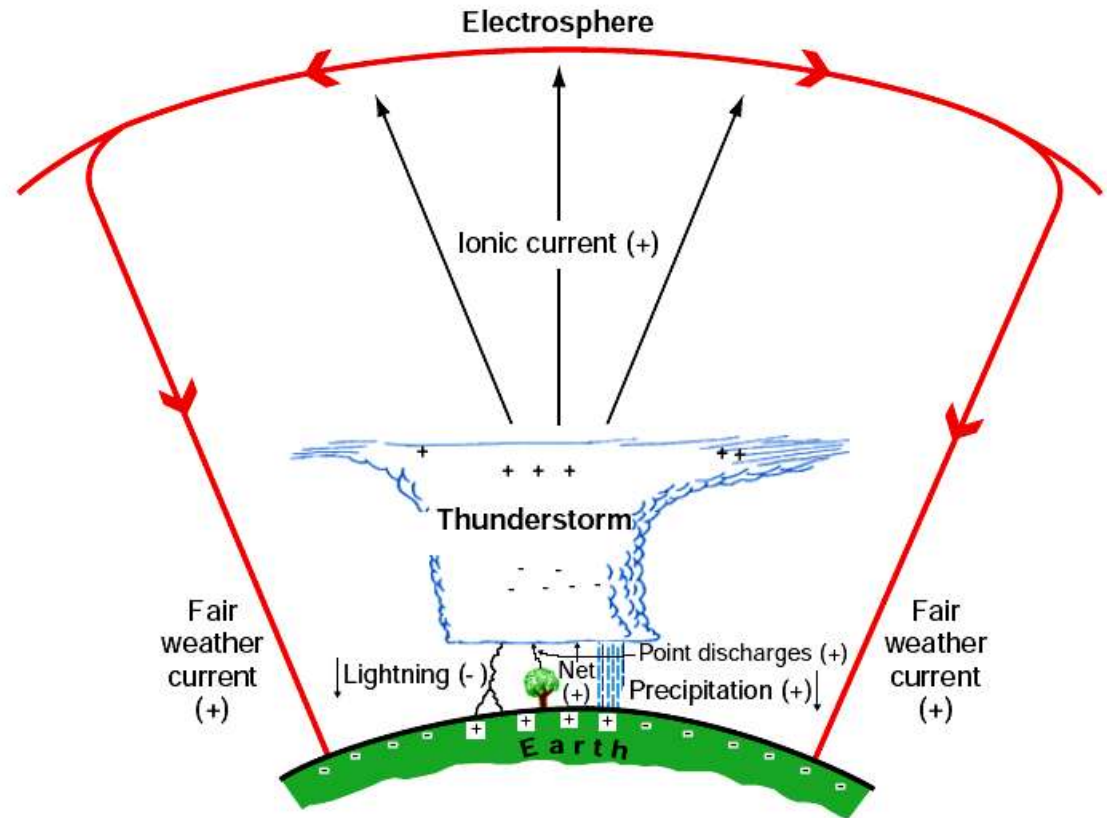
La magnitud del campo eléctrico de buen tiempo cerca de la superficie de la Tierra en promedio sobre el océano es  $\sim 130 \text{ V m}^{-1}$ , y en regiones industriales puede ser tan alto como  $360 \text{ V m}^{-1}$ . El alto valor en el último caso se debe al hecho de que los contaminantes industriales disminuyen la conductividad eléctrica del aire ya que partículas grandes y de movimiento lento tienden a capturar iones de mayor movilidad. Debido a que la densidad de corriente vertical (que es igual al producto del campo eléctrico y la conductividad eléctrica) debe ser la misma en todos los niveles, el campo eléctrico debe aumentar si la conductividad disminuye. A alturas por encima de unos 100 m, la conductividad del aire aumenta con la altura y por lo tanto el campo eléctrico de buen tiempo disminuye con la altura.

El aumento de la conductividad eléctrica con la altura se debe a la mayor ionización por rayos cósmicos y concentraciones decrecientes de partículas grandes. Por lo tanto, a los 10 km de altura sobre la superficie de la Tierra el campo eléctrico de buen tiempo es sólo el 3% de su valor justo por encima de la superficie. El potencial medio de la electrosfera con respecto a la Tierra es  $\sim 250$  kV, pero la mayor parte de la caída de tensión está en la troposfera.

La presencia del campo eléctrico de buen tiempo dirigido hacia abajo implica que la electrosfera lleva una carga positiva neta y la superficie de la Tierra una carga neta negativa. Lord Kelvin, quien en 1860 sugirió por primera vez la existencia de una capa conductora en la atmósfera superior, también sugirió que la Tierra y la electrosfera actúan como un condensador esférico gigantesco (el conductor interior sería la Tierra, el otro conductor es la electrosfera y el dieléctrico sería el aire). El campo eléctrico es casi constante a pesar de que la corriente que fluye en el aire (en promedio de  $2$  a  $4 \times 10^{-12}$  A  $m^{-2}$ ) sería lo suficientemente grande como para descargar el condensador en cuestión de minutos. Por lo tanto, debe haber un generador eléctrico en el sistema. En 1920, C. T. R. Wilson propuso que los principales generadores son las tormentas y nubes de lluvia electrificadas, idea que actualmente es universalmente aceptada.

Como hemos visto, las tormentas separan cargas eléctricas en una forma tal que sus regiones superiores se cargan positivamente y sus bases negativamente. Las cargas positivas superiores se filtran a la base de la electrosfera través de la atmósfera altamente conductora en estos niveles. Esto produce una carga positiva difusa en la electrosfera, que disminuye con la altura (como lo hace el campo eléctrico de buen tiempo) con una altura de escala de  $\sim 5$  km. Por debajo de una tormenta eléctrica la conductividad eléctrica del aire es baja. Sin embargo, bajo la influencia de grandes campos eléctricos, una corriente de cargas positivas, la *corriente de descarga puntual*, fluye hacia arriba desde la tierra (a través de árboles y otros obstáculos en punta). Las partículas de precipitación están polarizadas por el campo eléctrico de buen tiempo y por el campo eléctrico por debajo de tormentas eléctricas, de manera que tienden a recoger preferentemente iones positivos a medida que caen al suelo. Una carga positiva equivalente a aproximadamente el 30% de las descargas puntuales se devuelve a la tierra de esta manera. Por último, los rayos a tierra transportan las cargas negativas de las bases de tormentas eléctricas al suelo.

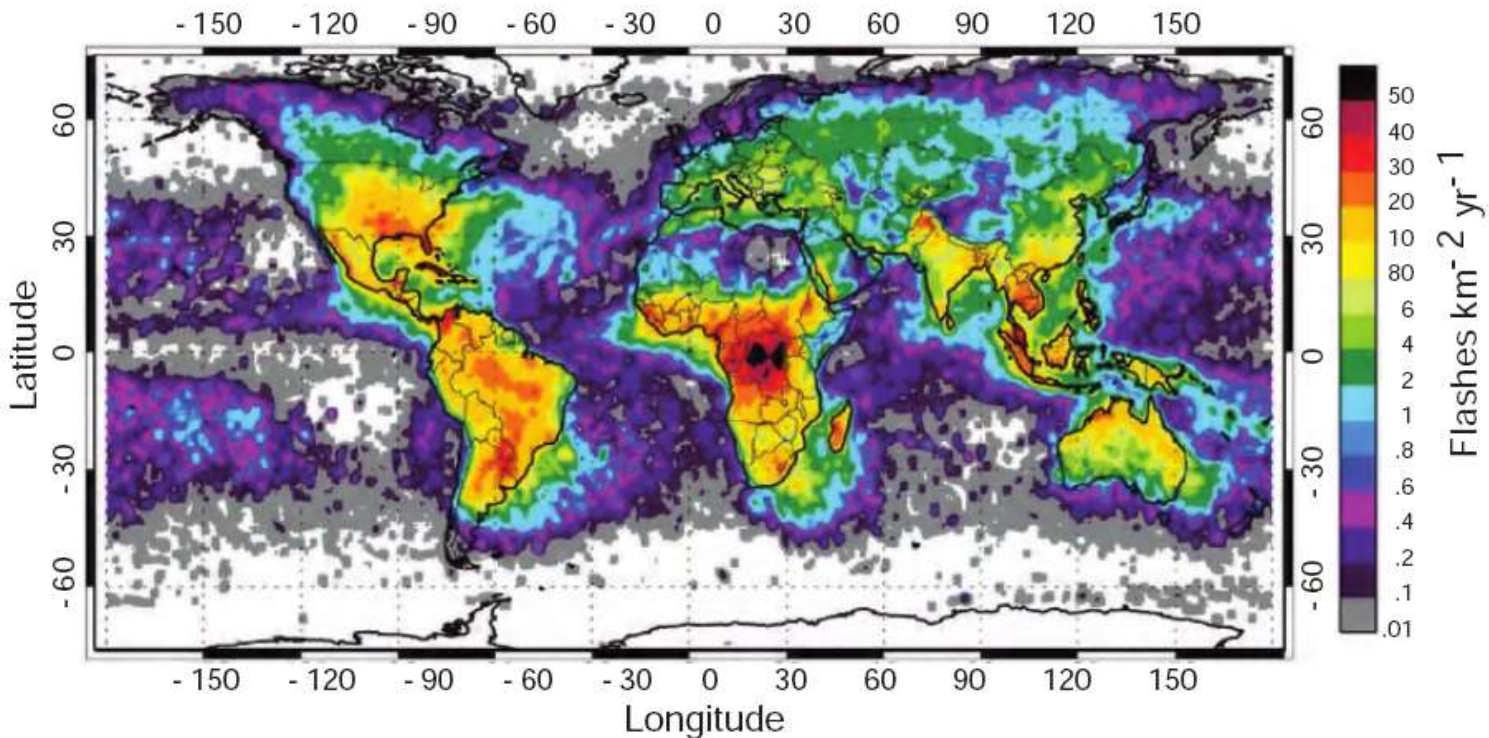
Un esquema del circuito eléctrico principal mundial se muestra en la Fig. 6.55. Un presupuesto eléctrico aproximado para la Tierra (en unidades de  $C \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ) es de 90 unidades de carga positiva obtenida de la conductividad de buen tiempo, 30 unidades ganadas por la precipitación, 100 unidades de carga positiva perdidas a través de descargas puntuales, y 20 unidades perdidas debido a la transferencia de cargas negativas a la Tierra por rayos a tierra.



**Fig. 6.55** Schematic (not drawn to scale) of the main global electrical circuit. The positive and negative signs in parentheses indicate the signs of the charges transported in the direction of the arrows. The system can be viewed as an electrical circuit (red arrows) in which electrified clouds are the generators (or batteries). In this circuit positive charge flows from the tops of electrified clouds to the electrosphere. Thus, the electrosphere is positively charged, but it is not at a sharply defined height. In fact most of the positive charge on the electrosphere is close to the Earth's surface. The fair-weather current continuously leaks positive charge to the Earth's surface. The circuit is completed by the transfer of net positive charge to the bases of electrified clouds due to the net effect of point discharges, precipitation, and lightning. In keeping with the normal convention, the current is shown in terms of the direction of movement of positive charge, but in fact it is negative charge in the form of electrons that flows in the opposite direction. See text for further details.



El monitoreo de los relámpagos desde los satélites (Fig. 6.56) muestra que la tasa media global de rayos es  $\sim 12\text{-}16 \text{ s}^{-1}$ , con una tasa máxima de  $\sim 55 \text{ s}^{-1}$  para la tierra en el verano en el hemisferio norte. La tasa media global de destellos de relámpagos en total (en nubes y rayos a tierra) es  $44 \pm 5 \text{ s}^{-1}$ , con un máximo de  $55 \text{ s}^{-1}$  en el verano del hemisferio norte y un mínimo de  $35 \text{ s}^{-1}$  en el invierno.



**Fig. 6.56** Global frequency and distribution of total lightning flashes observed from a satellite. [From H. J. Christian et al., “Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector,” *J. Geophys. Res.* **108**(D1), 4005, doi:10.1029/2002JD002347 (2003). Copyright 2003 American Geophysical Union. Reproduced by permission of American Geophysical Union.]

Alrededor del 70% de todos los relámpagos se produce entre 30° N y 30° S, lo que refleja la alta incidencia de nubes convectivas profundas en esta región. Sobre América del Norte los destellos se producen unos 30 millones de veces al año!

En los Estados Unidos hay una red de observación que detecta rayos a tierra. Mediante la combinación de los recuentos de rayos a tierra de esta red con los recuentos totales de destellos de las observaciones por satélite, puede derivarse la relación de destellos de nube a tierra y entre nubes. Esta proporción varía enormemente en los Estados Unidos, de un máximo de ~10 sobre Kansas y Nebraska, la mayor parte de Oregon, y partes del noroeste de California, a una proporción de ~1 a lo largo de los Apalaches, las Montañas Rocosas y la Sierra Nevada.

Debido a que el rayo se asocia con fuertes corrientes ascendentes en las nubes convectivas, las mediciones de los rayos pueden servir como un sustituto de la velocidad de las corrientes ascendentes y el mal tiempo.

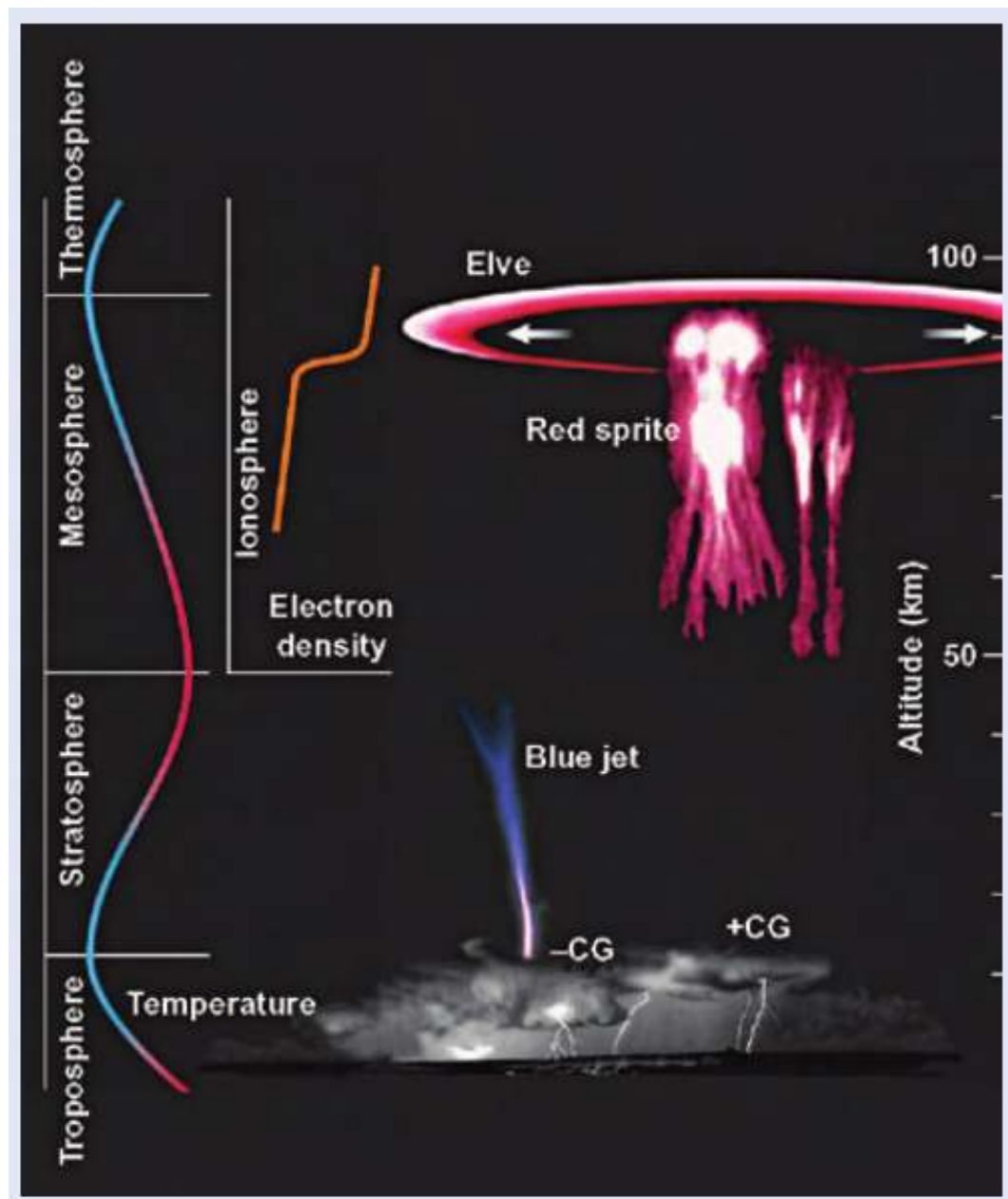
## Las descargas eléctricas ascendentes

En 1973 un piloto de la NASA, en un avión de vigilancia volando a 20 km, registró lo siguiente: *"Me acerqué a una vigorosa torre convectiva cerca de mi altitud que se ilumina frecuentemente desde dentro por relámpagos. La nube aún no había formado un yunque. Me sorprendió ver una descarga de rayo luminoso, de color blanco amarillento, que vino directamente del centro de la nube en su ápice y se extendió verticalmente hacia arriba por encima de mi altura. La descarga fue casi recta, como un rayo de luz, sin mostrar tortuosidad o ramificación. Su duración fue mayor que la de un rayo ordinario, quizás tanto como cinco segundos."*

Desde entonces, se han documentado numerosos tipos de fenómenos luminosos relacionados con los relámpagos transitorios en la estratosfera y la mesosfera, que se conocen con los nombres de sprites, elfos y chorros azules (Fig. 6.57).

Los sprites son destellos luminosos que duran desde unos pocos a unos pocos cientos de milisegundos. Los sprites se pueden extender desde ~90 km de altitud casi hasta las nubes más altas y más de 40 km en sentido horizontal. Son principalmente de color rojo, con reflejos azules en sus regiones inferiores; que a veces se pueden ver a simple vista.

**Fig. 6.57** Transient luminous emissions in the stratosphere and mesosphere. [Reprinted with permission from T. Neubert, "On Sprites and their exotic Kin." *Science* 300, 747 (2003). Copyright 2003 AAAS.]



Los sprites se cree que son generados por un pulso de campo eléctrico cuando cantidades particularmente grandes de carga positiva se transfieren de una tormenta eléctrica al suelo por un rayo, a menudo en las regiones estratiformes de grandes sistemas convectivos de mesoescala. En contraste con los canales completamente ionizados de un rayo normal, los sprites están sólo débilmente ionizados.

Los elfos son anillos luminosos con duración de microsegundos ubicados a ~90 km de altitud y centrados sobre un rayo. Se expanden hacia el exterior horizontalmente a la velocidad de la luz y son causados por el calentamiento de la atmósfera producido por el pulso electromagnético generado por un rayo. No son visibles a simple vista.

Los chorros azules son conos luminosos ionizados parcialmente, que se propagan hacia arriba desde la parte superior de tormentas eléctricas a velocidades de ~100 km s<sup>-1</sup> y alcanzan una altura de ~40 km. En ocasiones desencadenan sprites, creando así una alta conexión de conductividad eléctrica directa entre una tormenta y la ionosfera. Estos eventos raros no parecen estar relacionados directamente con rayos de nube a tierra. Tienen una duración de sólo ~100-200 ms y son difíciles de ver a simple vista incluso por la noche.

Se han reportado otras descargas que se propagan hacia arriba. La figura 6.58 muestra una columna de la luz blanca que se extiende hacia arriba, de alrededor de 1 km de longitud, desde la parte superior de una tormenta eléctrica.

Estos diversos fenómenos probablemente juegan un papel en el circuito eléctrico global y quizás también en la química de la estratosfera y la mesosfera de manera que todavía no se ha dilucidado.



**Fig. 6.58** Upward discharge from a thunderstorm near Darwin, Australia. There is a blue “flame” at the top of the white channel that extends upward another kilometer or so. [From *Bull. Am. Meteor. Soc.* 84, 448 (2003).]