

## FENÓMENOS ELÉCTRICOS

### A) IONIZACIÓN DEL AIRE

**276. Estructura del átomo.** — Para comprender los fenómenos eléctricos de la atmósfera es indispensable el conocimiento de la *estructura del átomo*.

Las moléculas que forman el aire se componen de átomos, y éstos, de un núcleo y un enjambre de pequeños satélites. El átomo más sencillo y liviano es el de *hidrógeno*. Su núcleo está compuesto por una "masa elemental", a la cual va adherida una cantidad, igualmente elemental, de electricidad "positiva", conjunto llamado *protón*. Alrededor de este minúsculo núcleo gira, con una velocidad elevadísima, un solo satélite, llamado *electrón*, pequeñísimo cuerpo casi sin masa, aunque con una cantidad elemental de electricidad "negativa".

Los átomos de los *demás elementos* tienen una estructura análoga. También en ellos, alrededor de un núcleo compuesto por cierto número de protones, acompañados de una cantidad variable de *neutrones*, gira igual número de electrones. El número de elementos llega a 96. De ellos, los primeros 92 se encuentran en la naturaleza; los 4 restantes se producen en el laboratorio.

El *electrón* es probablemente sólo un minúsculo torbellino de "algo" que antes llamábamos éter, pero cuya verdadera naturaleza no conocemos todavía. El diámetro del electrón es de  $4 \cdot 10^{-13}$  cm, y su masa, "en reposo", de  $9,108 \cdot 10^{-28}$  g. Según los conceptos actuales, esta masa aumenta con la velocidad. Si la velocidad se incrementa mucho, el electrón tiende a perder su forma y a transformarse en onda. La velocidad media de giro del electrón de un átomo de hidrógeno es de 2000 km/sec, suficiente para rodear al núcleo  $6 \cdot 10^{15}$  veces en el término de un segundo. La carga eléctrica que contiene un electrón, llamada también *cantidad elemental de electricidad negativa*, es de  $1,602 \cdot 10^{-19}$  culombios.

El torbellino que parece ser el electrón, afecta al espacio que le rodea. La influencia se manifiesta en forma de "repulsión" cuando se encuentra otro electrón

en su cercanía, y en forma de "atracción" cuando se trata de un protón. El espacio dentro del cual se manifiesta esta influencia es llamado su campo electromagnético. La influencia misma se propaga con una velocidad de 300 000 km/sec.

El *protón* es mucho más compacto que el electrón, y por esto mismo, 100 veces menor. Su diámetro llega sólo a  $5 \cdot 10^{-15}$  cm, pero su masa a  $1,6727 \cdot 10^{-24}$  g; es, pues, 1837,3 veces más pesado que el electrón. La carga eléctrica que contiene es igual a la del electrón, pero de signo positivo.

El *neutrón* parece ser un protón al cual va adherido un electrón. El estado eléctrico del mismo es, en consecuencia, "neutro". Su masa es algo mayor que la del protón,  $1,6749 \cdot 10^{-24}$  g.

Entre los protones, cargados de electricidad positiva, existe repulsión. Por esta razón, los núcleos de los átomos tendrían que desintegrarse. Esta tendencia es anulada por la acción de los *mesones*, especie de cuerpos intermedios entre electrones y protones. Así como la pelota de tenis mantiene unidos a los cuatro jugadores, también los mesones mantienen la cohesión entre los protones y neutrones del núcleo, con su incesante vaivén entre ellos, transformando los protones en neutrones, y éstos en protones,  $5 \cdot 10^{17}$  veces en el término de un segundo.

El enjambre de electrones gira alrededor de los núcleos en órbitas circulares. Existen 7 órbitas, en total. En la primera pueden revolotear 2 electrones, en la segunda y tercera 8, y en cada una de las restantes 18 electrones. El distanciamiento de estas órbitas crece, desde el centro, en progresión geométrica.

Llama la atención el gran vacío que existe en el mundo material. Si al núcleo de hidrógeno nos lo representamos por medio de una cereza, el electrón, cual una abeja, lo estaría rondando a 1 km de distancia. El próximo átomo se encontraría a 400 km de distancia. A través de este vacío, como se comprende, los electrones, protones y núcleos de helio libres vuelan con toda facilidad, y las variadas radiaciones que existen se propagan sin mayor impedimento.

**277. El proceso de ionización.** — La velocidad del movimiento molecular del aire crece con la temperatura. Los choques entre las moléculas son cada vez más violentos. Llegando a cierto límite, las moléculas se descomponen en átomos, proceso llamado *disociación*. La temperatura en que se verifica este proceso se denomina "temperatura crítica".

Un lindo ejemplo se tiene en la descomposición del *vapor de agua*, formado de pequeños conjuntos de 5 moléculas de agua. Pasada la temperatura de  $100^\circ$  se inicia el progresivo despegue de las moléculas, que termina a los  $374^\circ$ . En este instante el agua se encuentra en el espacio en forma de una simple "dispersión molecular". Superada esta temperatura, las moléculas de agua se disocian; por cada una aparece un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno.

Si la temperatura sigue en aumento, la propia estructura de los átomos pelagra. Debido a los choques, cada vez más violentos, se desprenden electrones de las órbitas exteriores de ellos. Desde este momento, las cargas eléctricas de los átomos no están más equilibradas; prevalece la carga eléctrica positiva. Átomos y también grupos de átomos, o sean moléculas, a los cuales faltan electrones, y por

consiguiente sobran protones, se llaman *iones*<sup>1</sup> *positivos*. Ellos son, por esta razón, los transportadores de la electricidad positiva.

Los electrones desprendidos vuelan a través del espacio, entrechocando con los átomos y moléculas que encuentran en su camino. Si la fuerza de atracción de éstas es suficiente para retenerlos, quedan adheridos a ellas. Mientras dura la adhesión, estos conjuntos tienen un exceso de carga negativa, por lo cual se los llama *iones negativos*. Ellos son los transportadores de electricidad negativa.

**278. Desintegración de los átomos.**— Si la temperatura del medio en que se encuentran los átomos aumenta progresivamente, éstos no sólo pierden sus electrones, sino que el núcleo mismo se descompone, volando sus componentes, los protones, en todas direcciones, con una velocidad elevadísima, destruyendo todos los átomos y moléculas que encuentran en su camino.

La *desintegración* se verifica de la siguiente manera:

Primero, aumenta la velocidad de giro de los electrones, agrandándose a la vez sus órbitas. Cuando la temperatura alcanza un determinado valor, comienza el salto de los electrones de las órbitas interiores a las exteriores. Durante el tiempo que dura este proceso, el átomo se encuentra en *estado de excitación*.

Cuando la temperatura llega a los 1 000°, la velocidad de los electrones en las órbitas exteriores es ya tan grande, que la fuerza de atracción del núcleo no es más suficiente para retenerlos. En consecuencia, el átomo principia a perder electrones y a transformarse en ión positivo. Mientras dura esta pérdida, el átomo se encuentra en *estado de ionización*.

Si continúa el aumento de la temperatura, prosigue también el desprendimiento de los electrones. Cuando el incremento llega a los 100 000°, del átomo ya no queda más que el núcleo. Se dice, entonces, que el átomo se encuentra en *estado de nucleización*.

Por fin, si la temperatura se eleva a 10 millones de grados, los propios núcleos peligran. El movimiento de los protones y neutrones de que está formado es cada vez más violento, y los choques entre ellos más fuertes, hasta que, por último, vuelan en todas direcciones, deshaciéndose con ello el núcleo por completo. En este momento el átomo se encuentra en *estado de fisión*.

Por cierto, ni en la superficie de la Tierra ni en la atmósfera se observan temperaturas tan elevadas que sean capaces de producir esta descomposición, pero sí en el Sol y en las estrellas recientemente explotadas, las llamadas Super-Novas. En la superficie del Sol, la temperatura es de 6 000°; en su interior, de unos 20 millones de grados, y en las Super-Novas, más todavía. El Sol y las Super-Novas son, por esta razón, focos de una *radiación corpuscular*, formada de electrones, protones, neutrones y núcleos de helio, de ex-

<sup>1</sup> Ion, del gr.: ion, "que va".

cepcional importancia para la vida en la Tierra y para el estado eléctrico de su atmósfera.

**279. Radiación electromagnética.** — Tanto el movimiento de los electrones y protones en los átomos como el movimiento de los átomos y moléculas dentro de los cuerpos consiste en el desplazamiento sucesivo de pequeñas masas de electricidad. Estos desplazamientos afectan al estado electromagnético del espacio circundante, el cual experimenta, por esta razón, una “convulsión”. Las convulsiones se manifiestan como vibraciones que se propagan a través del espacio en forma radial, con una velocidad de 300 000 km/sec, denominándose las radiaciones ondulatorias o electromagnéticas.

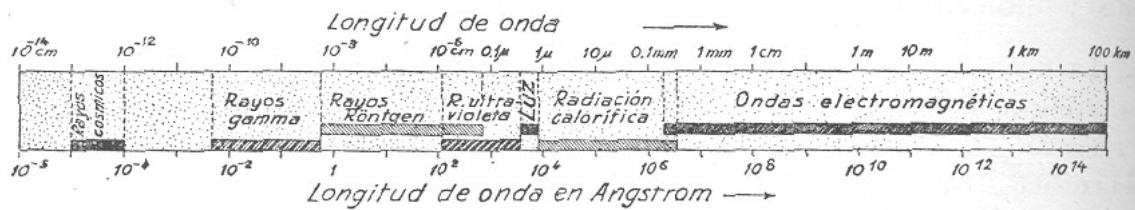


FIG. 356. — Las siete radiaciones, consistentes en ondas electromagnéticas, conocidas hasta hoy.

La frecuencia y la longitud de onda de estas radiaciones dependen de la naturaleza de la masa eléctrica que las origina y de la magnitud y rapidez con que vibra (fig. 356).

Se distinguen siete clases de radiaciones:

a) ondas electromagnéticas .....	$\lambda = \infty - 2.10^6 \text{ \AA}^1$
b) radiación térmica .....	„ = $3,4.10^6 - 7,8.10^3$ „
c) radiación luminosa .....	„ = $7,8.10^3 - 3,6.10^3$ „
d) radiación ultravioleta .....	„ = $3,6.10^3 - 1,36.10^2$ „
e) rayos X o rayos Röntgen .....	„ = $6,6.10^2 - 1,58.10^1$ „
f) radiación gamma .....	„ = $0,466.10^2$ „
g) radiación cósmica secundaria .....	„ = $10^{-4} - 10^{-5}$ „

Mientras se trate solamente del movimiento molecular del aire, las masas eléctricas que se desplazan son las moléculas y los átomos de los gases que componen el aire. Los espacios recorridos entre choques sucesivos son relativamente grandes, y por consiguiente los encuentros son poco frecuentes. La longitud de

<sup>1</sup> Å, léase *Ångström*, significa 10<sup>-8</sup> cm, o sea un cienmillonésimo de centímetro; unidad longitudinal muy usada en la física atómica.

onda producida, por esta razón es un tanto larga. Esta especie de perturbación del campo eléctrico la percibimos como *radiación térmica*. Ella abarca las ondas entre  $340 \mu$  y  $0,78 \mu$  de longitud.

Los espacios que recorren los electrones al saltar de las órbitas exteriores a las interiores son menores, y los tiempos empleados, más cortos. La longitud de la onda producida es menor, y mayor su frecuencia. Esta clase de perturbación del campo electromagnético la percibimos como *radiación luminosa*, que abarca las ondas entre  $0,78 \mu$ , correspondientes al color rojo, y  $0,36 \mu$ , correspondientes al color azul.

Cuanto más pequeñas son las órbitas de los electrones, tanto menores son también sus saltos, y más cortas las ondas que producen. Si un electrón salta de la segunda órbita a la primera, la perturbación no puede ser ya captada por nuestra vista. Estamos frente a la *radiación ultravioleta*, desde  $0,36 \mu$  hasta  $0,0136 \mu$  de longitud.

Si el núcleo de un átomo es muy grande, es también grande la fuerza de atracción que ejerce sobre sus electrones. Los saltos de éstos son, en consecuencia, rápidos, elevada la frecuencia de la onda producida, y corta su longitud. Esta clase de perturbación se llama, en honor a su descubridor, *rayos Röntgen*, o también *rayos X*. Son conocidos por su penetración en los tejidos orgánicos. Esta radiación abarca las ondas entre  $660 \text{ \AA}$  y  $15,8 \text{ \AA}$ .

Para que los protones que forman los núcleos también efectúen movimiento, se requiere muchísima energía. Por supuesto, sus saltos son pequeños y brevísimos; la frecuencia de la perturbación es, por consiguiente, muy elevada, y sumamente corta la longitud de la onda producida. Esta radiación, muy peligrosa para la vida orgánica, se llama *radiación gamma*. La longitud de su onda es de sólo  $46,6 \text{ \AA}$  por término medio. Únicamente el plomo, con sus átomos grandes y pesados, representa un obstáculo para su propagación.

Todos los desplazamientos de moléculas, átomos, electrones y protones que pueden afectar el campo electromagnético circundante, se deben a altas temperaturas.

Los cuerpos celestes, entre ellos nuestro *Sol*, han adquirido su elevada temperatura actual progresivamente, densificando la materia que los compone, por medio de la atracción gravitacional de su núcleo. La temperatura del Sol sigue aumentando todavía, según los conceptos actuales, debido a ciertos "procesos nucleares" que se verifican en su interior, y que consistirían en la formación de núcleos de helio, agrupando cuatro protones, y perdiendo una pequeñísima masa transformada en energía. Esta formación continua de helio parece ser la *fuerza de energía solar*. La consumición de la masa solar íntegra en este proceso podría sostener la intensidad de la radiación solar actual,  $1,94 \text{ cal/cm}^2\text{min}$ , durante  $15,8 \cdot 10^{12}$  años; o sea durante 158 000 millones de siglos.

La relación entre el estado de una masa eléctrica y su campo electromagnético es una *relación recíproca*. Cualquier movimiento o desplazamiento de una masa eléctrica produce convulsiones en el campo electromagnético circundante, que se manifiesta en forma de un movimiento ondulatorio del medio, vulgarmente denominado "éter". Y, a la inversa, todo movimiento ondulatorio del campo electromagnético, o del "éter", afecta al estado de la masa eléctrica, formada por electrones, protones y neutrones, que se encuentra en su esfera de influencia.

El movimiento molecular de la materia produce la radiación calorífica; esta radiación intensifica el movimiento molecular de la materia. Los saltos de los electrones de la segunda órbita a la primera engendran la radiación ultravioleta; la radiación ultravioleta arranca los electrones de sus órbitas. La vibración de los protones nucleares origina los rayos gamma; los rayos gamma, a su vez, además de liberar a los electrones de sus órbitas desintegran los núcleos atómicos.



FIG. 357. — Penetración de la radiación cósmica en la atmósfera, según Millikan.

**280. Radiación cósmica.** — Del espacio interestelar penetra en la atmósfera de la Tierra una "radiación corpuscular" formada por protones, cuya energía supera extraordinariamente a la intensidad de la radiación solar. Según toda probabilidad, esta radiación proviene de las estrellas explotadas recientemente, de las llamadas "Super-Novas", por lo cual se la denomina *radiación cósmica*. Sin embargo, no está excluida la posibilidad de que provenga asimismo del Sol.

La radiación cósmica destruye las moléculas de aire que encuentra en su camino, liberando los protones, neutrones y electrones de que se componen. Estos productos de desintegración afectan, a su vez, a las moléculas de aire con las cuales chocan. La influencia de la radiación cósmica se propaga, por consiguiente, en forma de cascada. Desde luego, la intensidad de este proceso disminuye con el espesor de la masa aérea traspasada (fig. 357). Si así no fuera, en la Tierra quedaría destruída la vida orgánica.

Por la desintegración que realiza en las moléculas de aire, la radiación cósmica es el factor ionizador más potente que se conoce.

En la figura 358 están representados, en forma esquemática, se entiende, los fenómenos que esta radiación origina en la atmósfera. Omitimos la descripción de los mismos, por ser ajena a los fines de este libro.

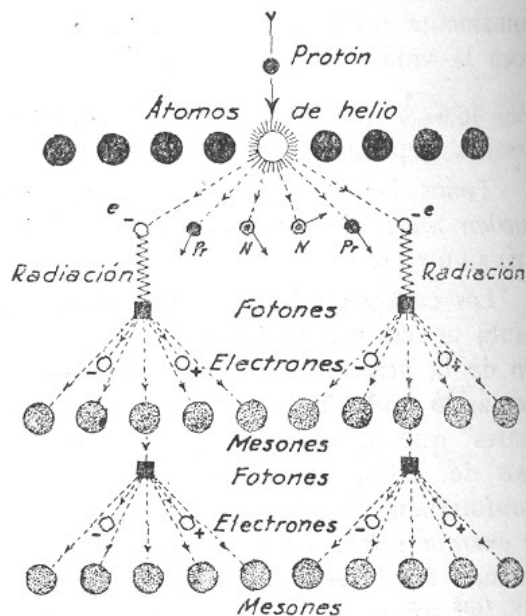


FIG. 358. — De las estrellas Super-Novas llegan a la atmósfera protones que destruyen los átomos. Los electrones, protones y neutrones liberados multiplican este efecto. Todos los procesos rematan en la formación de electrones.

**281. Radiactividad de la corteza terrestre.** — En los átomos pesados, que contienen más de 86 protones en sus núcleos, la fuerza de cohe-

sión no es ya suficiente para contrarrestar su fuerza de repulsión. Estos átomos se desintegran. Es como si se encontrasen bajo la influencia de una temperatura muy elevada, capaz de aflojar su estructura y producir su descomposición. El proceso fué descubierto, en 1896, por BECQUEREL, y denominado más tarde, por los esposos CURIE, *radiactividad*.

Durante esta descomposición, no sólo los átomos en sí, sino también los protones de los núcleos están en vibración. La vibración de los átomos produce una radiación térmica, y la vibración de los protones, los rayos gamma, desprendiéndose de ellos, al mismo tiempo, núcleos de helio, rayos  $\alpha$ , y electrones, rayos  $\beta$  (fig. 359). Como sabemos, tanto los rayos gamma como los núcleos de helio y los electrones son capaces de ionizar el aire. El efecto es, sin embargo, pequeño, y se reduce a las bajas capas atmosféricas.

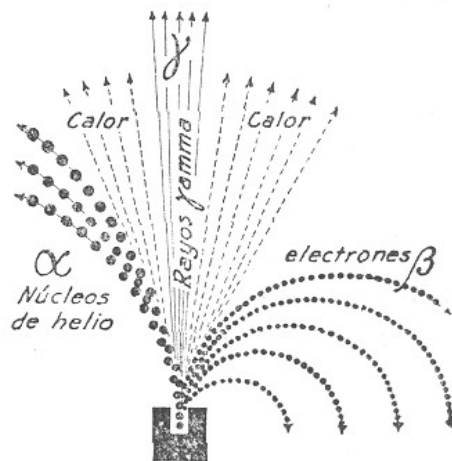


FIG. 359. — Las materias radiactivas emiten cuatro clases de radiaciones: núcleos de helio o rayos  $\alpha$ , electrones o rayos  $\beta$ , rayos  $\gamma$  y radiación térmica.

ELSTER y GEITEL han demostrado que no sólo ciertas rocas contienen sustancias radiactivas, como radio, uranio y torio, sino también todos los componentes de la corteza terrestre, si bien en medida muy distinta. A esta radiactividad tan desigual de la superficie de la Tierra se debe el complejo estado de ionización del aire en la cercanía del suelo.

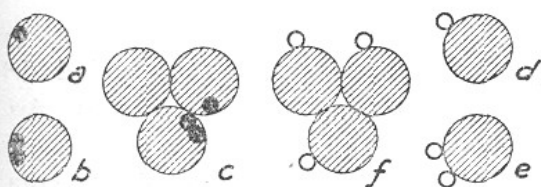


FIG. 360. — Clases de iones. a, b y c: iones positivos; d, e y f: iones negativos; a, b, d y c: iones atómicos; c y f: iones moleculares; a y d: iones monovalentes; b y e: bivalentes; c y f: trivalentes.

**282. Clases de iones.** — Como consecuencia de la acción de los factores ionizantes, existe una considerable cantidad de iones en la atmósfera. Se distinguen tres clases de iones:

a) **IONES GASEOSOS.** Si un átomo o molécula carece de uno o varios electrones, se lo llama *ion gaseoso*

*positivo*. Según se trate de un átomo o de una molécula, y según el número de protones no compensados eléctricamente, distinguimos iones atómicos positivos monovalentes, bivalentes y plurivalentes, y iones moleculares positivos monovalentes, bivalentes y plurivalentes, respectivamente (fig. 360).

Los electrones separados de los átomos, merced a su gran velocidad pueden escapar de la atmósfera, pero pueden adherirse también a algún átomo o molécula por cuya cercanía pasen si la fuerza de atrac-

ción de éstas es suficiente para atraparlos. Átomos y moléculas a las cuales va adherido algún electrón se llaman *iones negativos*. De esta denominación gozan también los electrones libres.

Desde luego, los iones tienen tendencia a "normalizar" su carga eléctrica. Los iones positivos tratan de atrapar electrones; los iones negativos, de deshacerse de ellos. Los dos fines se consiguen con la unión de ellos, intercambiándose electrones. Esta *recombinación de los iones* se verifica sin cesar en la atmósfera, y es una de las causas de la continua fluctuación en que se encuentra su estado eléctrico.

b) IONES LIVIANOS. Los conjuntos moleculares que forman el vapor de agua, por lo común carecen de equilibrio eléctrico, sobrándoles o faltándoles electrones. Partículas de vapor de agua en tal estado se llaman *iones livianos*.

En Pilar, cerca de Córdoba, se registraron, término medio, 2 272 iones livianos por centímetro cúbico, de los cuales 1 147 suelen tener carga positiva, y 1 125, carga negativa. En comparación con el número de moléculas de aire que hay en 1 cm<sup>3</sup>, esta cantidad es, desde luego, muy pequeña.

c) IONES PESADOS. Partículas sólidas a las cuales se encuentra adherida alguna carga eléctrica, formada por iones gaseosos o iones livianos, se llaman *iones pesados* o iones de LANGEVIN. Todas las partículas sólidas se encuentran en este estado. Su número es, por esto mismo, elevado, oscilando entre 500 y 50 000 por centímetro cúbico en la cercanía del suelo. Esta cantidad disminuye rápidamente con la altura.

También los iones se encuentran en un movimiento perenne. Por la pequeñez de los mismos, este movimiento está condicionado por la intensidad del campo eléctrico en que se encuentran más que por la fuerza de gravedad. Así, la velocidad gravitacional de los iones livianos suele ser de unos centímetros por hora, pero la velocidad en un fuerte campo eléctrico, por ejemplo en una tormenta, de 10 a 100 m/sec.

Por supuesto, tanto los iones livianos como los pesados participan de los movimientos de las masas aéreas que los albergan, siendo por esta razón simples juguetes de los vientos.

## B) ESTADO ELÉCTRICO DE LA TIERRA Y DE LA ATMÓSFERA

283. *Carga eléctrica de la corteza terrestre.* — La corteza terrestre acusa una carga eléctrica negativa que se estima en unos 540 000 culombios. Recordando que un culombio representa  $3\,000 \cdot 10^6$  de unidades electrostáticas de electricidad, se ve que esta carga es formidable. Comparada con ella, cualquier cantidad de electricidad conducida a la Tierra es despreciable.



La *densidad superficial* de esta carga se avalúa en 667 000 electrones por centímetro cuadrado, término medio.

En el interior de la Tierra reinaría una presión muy elevada, de unos 3 500 millones de atmósferas por centímetro cuadrado, y a la vez, una temperatura muy alta, 3 800° C, o más, todavía. En tales condiciones, los átomos no pueden conservar su equilibrio eléctrico: los electrones se separan de sus respectivos núcleos. Una vez en libertad, debido a la repulsión que existe entre ellos, se alejan lo más posible unos de otros, llegando a ocupar la corteza terrestre. Ésta es la teoría de H. HAALCK, emitida en 1937. Actualmente, sin embargo, prevalece la opinión de que la carga negativa de la Tierra tiene su fuente de provisión en las tormentas. Mas nada definitivo se sabe a este respecto.

**284. Carga eléctrica de la atmósfera.** — Las fuentes de las cuales provienen los factores ionizadores de las moléculas de aire son, como hemos visto, tres: la Tierra, el Sol y las estrellas Super-Novas. Conforme con ellas, se distinguen también tres clases de *agentes ionizadores*: terrestres, solares y cósmicos.

Los *agentes terrestres* provienen de la radiactividad de la corteza terrestre, y están constituídos por núcleos de helio, por electrones y por rayos gamma. El efecto de los mismos no es muy grande, y queda reducido a las capas aéreas cercanas al suelo. Entre los iones engendrados prevalecen los positivos, porque muchos iones negativos quedan adheridos a la tierra en los tubos capilares, por los cuales ascienden a la superficie.

Los *agentes solares* son los electrones, núcleos de helio y rayos gamma que vienen de nuestro astro rey. Los electrones llegan con una velocidad de 100 000 km/sec y más, y ionizan las capas atmosféricas arriba de los 180 km de altura. Los núcleos de helio, más pesados que los electrones, llegan con menor velocidad, unos 20 000 km/sec, pero penetran más profundamente en la atmósfera. La ionización del aire más allá de los 70 km se debe a ellos. Los rayos ultravioleta llegan con la velocidad de la luz a la Tierra. Los de onda corta ionizan el aire; los de onda media engendran el ozono. Sólo los rayos de onda larga atraviesan toda la atmósfera y llegan hasta la superficie de la Tierra.

El *agente cósmico*, formado por protones, penetra con la velocidad de la luz en la atmósfera, destruyendo las moléculas de aire que encuentra en su camino. Los electrones, protones y neutrones así libertados multiplican este efecto. La ionización del aire sobre los mares es obra casi exclusiva de este agente.

Por la facilidad con que los electrones libertados durante el proceso de ionización escapan de la atmósfera, el número de iones positivos es algo mayor que el número de iones negativos, en cualquier capa aérea que se considere. Por esta razón puede decirse, también, que la atmósfera en su conjunto posee una carga eléctrica *positiva*.

**285. Grado de ionización en distintas alturas.** — Si la atmósfera fuese homogénea, la máxima ionización, expresada por el número de iones por centímetro cúbico, se encontraría en su límite superior, ya que los principales agentes ionizadores son de origen extraterrestre.

La realidad es otra, sin embargo, debido a la disminución de la densidad del aire con la altura. Por esta razón, los agentes ionizadores penetran profundamente en la atmósfera antes de que alcancen el máximo grado de eficacia, momento desde el cual su poder ionizador disminuye nuevamente, como consecuencia del desgaste de su energía cinética.

La Tierra está rodeada, por esta causa, de varias capas aéreas de acentuado grado de ionización y, por consiguiente, buenas conductoras de electricidad (fig. 361).

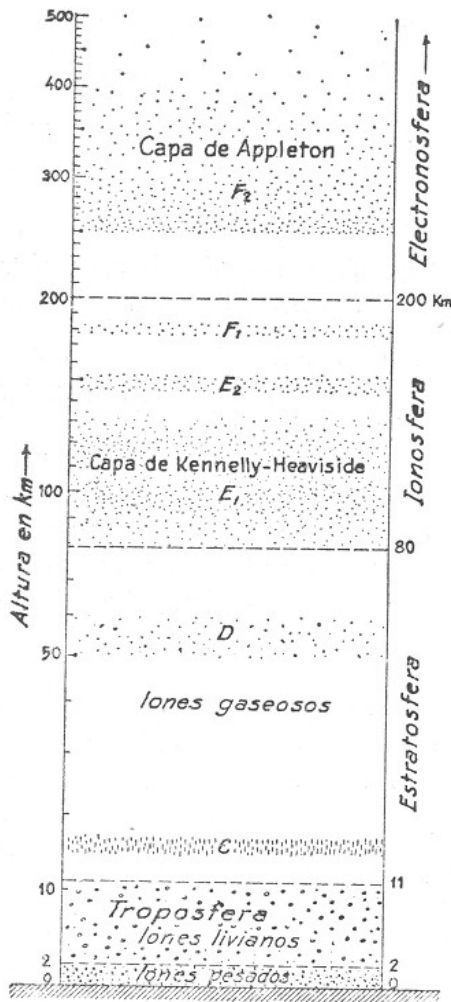


FIG. 361. — Las diversas capas aéreas que rodean a la Tierra, según sus características eléctricas.

La radiación menos penetrante es la radiación electrónica solar. Ella sólo ioniza las capas atmosféricas muy elevadas. La llamada *capa de Appleton*, que se encuentra entre 250 y 400, ó 600, a veces hasta 1 000 km de altura, y su acompañante de verano, situado aproximadamente a 180 km de altura, se deben a este agente ionizador.

Los núcleos de helio, provenientes del Sol, alcanzan su máxima influencia entre los 90 y 130 km de altura; son los causantes, pues, de la llamada *capa de Kennelly-Heaviside*.

La radiación ultravioleta afecta sólo a una mitad de la atmósfera, la iluminada por el Sol. La existencia de una capa aérea, a 55 km de altura, llamada *capa D*, perturbadora de las transmisiones radioeléctricas, se debe a su influencia.

El máximo efecto de la radiación cósmica se encuentra, aparentemente, a 16 km de altura. A ella se debe la existencia de la llamada *capa C*.

### 286. Estructura eléctrica de la atmósfera. — Una subdivisión de la atmósfera en capas de determinadas características

eléctricas puede efectuarse basándose en la clase y cantidad de iones que contienen (fig. 361). Las capas así obtenidas coinciden con las descritas en el § 43.

Estas capas son:

- |                            |       |     |       |      |               |
|----------------------------|-------|-----|-------|------|---------------|
| a) capa de iones pesados,  | desde | 0   | hasta | 2    | km de altura; |
| b) capa de iones livianos, | „     | 2   | „     | 11   | „ „ „         |
| c) estratosfera            | „     | 11  | „     | 80   | „ „ „         |
| d) ionosfera               | „     | 80  | „     | 200  | „ „ „         |
| e) electrosfera            | „     | 200 | „     | 1200 | „ „ „         |

La zona de turbulencia, que llega hasta 2 km de altura, está llena de partículas sólidas. Ésta es, pues, la *capa de iones pesados*.

La troposfera contiene vapor de agua. La mayoría de estas partículas están ionizadas. La troposfera representa, en consecuencia, la *capa de iones livianos*.

La estratosfera inferior, formada principalmente por nitrógeno, está fuertemente ionizada. No tiene una designación especial.

La estratosfera superior, compuesta por He, N<sub>1</sub> y O<sub>1</sub>, posee un grado de ionización elevadísimo. A los 100 km de altura, el número de iones por centímetro cúbico se estima en 10 millones. Por esta razón se la llama *ionosfera*.

Por encima de la ionosfera, hasta los límites borrosos de la atmósfera, se extiende la *ionosfera superior*, denominada recientemente esfera de disipación, pero que más bien conviene llamar *electrosfera*, por el gran número de electrones que la atraviesan en todas direcciones, saliendo unos y penetrando otros. El número de electrones por centímetro cúbico se estima en un millón.

**287. Oscilaciones de la ionosfera.** — La ionización de las altas capas atmosféricas, debido a los rayos ultravioletas provenientes del Sol, es mayor durante el día que durante la noche. En consecuencia, el límite inferior de la ionosfera, coincidente con la capa de KENNELLY-HEAVISIDE, experimenta *oscilaciones en altura* que llegan a 30 km (fig. 362).

Como en esta capa se reflejan las ondas hertzianas cortas, empleadas en la radiotelegrafía, se comprende que estas variaciones puedan tener consecuencias. En efecto, durante las horas del crepúsculo matutino, las ondas cortas experimentan una reflexión anormal, lo que puede llevar a una falsa determinación de la posición de un avión obligado a guiarse mediante instrumental.

**288. Conductibilidad eléctrica del aire.** — En los sólidos y los líquidos, las moléculas se encuentran "en contacto". En los mismos, la corriente eléctrica es un flujo de electrones. Semejante "flujo" no puede existir en el aire, donde las moléculas están separadas por un espacio 400 veces mayor que su propio diámetro. Una corriente eléctrica a través del aire consiste, por esta razón, en un *transporte de electrones*. Los vehículos de transporte son los "iones".

La "intensidad de la corriente" se expresa por la cantidad de electrones que atraviesan una pequeña sección en un segundo. Esta cantidad es tanto mayor cuanto mayor es el número de iones y cuanto mayor el espacio que recorren entre dos choques sucesivos. Tanto el número de iones como el espacio entre dos colisiones au-

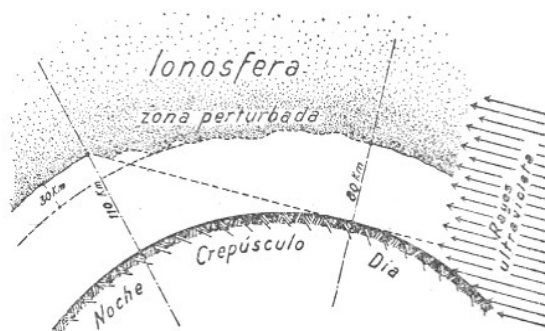


FIG. 362. — Descenso de la base de la ionosfera durante el crepúsculo matutino, debido a los rayos ultravioletas provenientes del Sol.

mentan con la elevación, por lo cual la *conductibilidad eléctrica* del aire mejora progresivamente (fig. 363).

Debido al repentino aumento del número de iones en el límite superior de la estratosfera, la ionosfera y la electronosfera son buenos conductores de electricidad.

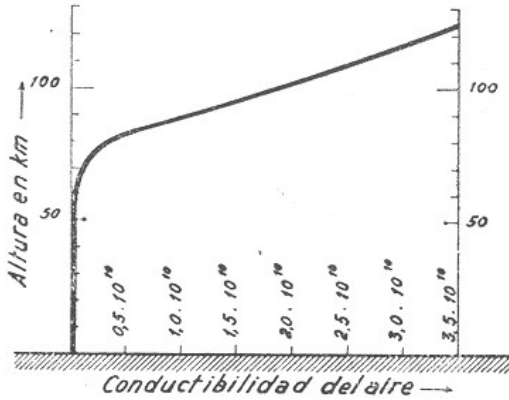


FIG. 363. — Conductibilidad eléctrica del aire en la altura, en comparación con la reinante en la superficie.

**289. Régimen eléctrico de la atmósfera.** — La Tierra, junto con su atmósfera, puede ser considerada como un potente *condensador eléctrico*. La armadura interior la constituye la corteza terrestre, con su carga negativa; la armadura exterior la ionosfera, con su carga positiva. El dieléctrico, o sea la capa aisladora que mantiene separadas estas dos cargas, es la masa de aire que se extiende hasta los 80 km de altura.

Si el aire fuese un aislador perfecto, la carga de la corteza terrestre influiría la carga eléctrica de las capas aéreas superiores, atrayendo la positiva y rechazando la negativa. De esta manera, los iones positivos estarían acumulados en la ionosfera, y los negativos en la electronosfera. Pero no lo es; el aire es un mal conductor de electricidad, por lo cual existe un flujo de electricidad positiva, dirigida desde la ionosfera hacia la Tierra, y otro flujo de electricidad negativa, desde la Tierra hacia la ionosfera. La mayor parte de estas corrientes se neutraliza por medio de "recombinación de los iones", pero queda un considerable remanente positivo, debido a la dificultad con que los electrones se desprenden de la corteza terrestre. Subsiste, por consiguiente, una *corriente eléctrica positiva, descendente*, dentro de la atmósfera de la Tierra (fig. 364).

La intensidad de esta corriente se estima en 1 350 amperios para todo el globo terráqueo, y en 24 milonésimos de amperio por kilómetro cuadrado; de modo que 1700 "cargas elementales de electricidad positiva" atraviesan un centímetro cuadrado en un segundo. Ella representa la "carga positiva" de la atmósfera. Su masa alcanza a 540 000 culombios; es, pues, igual a la "carga negativa" que posee la corteza terrestre.

Mediciones directas, efectuadas hasta 15 km de altura, y deducciones analíticas basadas en ellas, nos dan, según H. BENNDORF, el siguiente cuadro del estado eléctrico de la atmósfera:

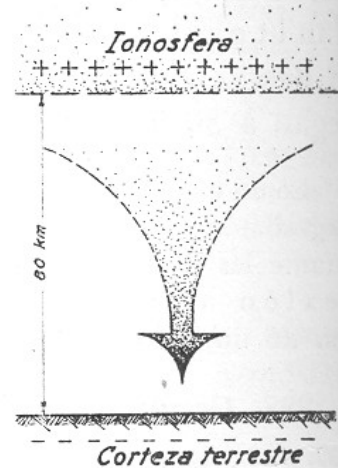


FIG. 364. — Corriente eléctrica positiva descendente, producida por la carga negativa de la corteza terrestre.

Mediciones directas, efectuadas hasta 15 km de altura, y deducciones analíticas basadas en ellas, nos dan, según H. BENNDORF, el siguiente cuadro del estado eléctrico de la atmósfera:

Altura:	Carga total en culombios:	Resistencia en ohmios:	Potencial en voltios:	Gradiente potencial volt/m:	Conductibilidad en $\text{sec}^{-1}$ :
80 km	$5,4 \cdot 10^5$	157	213 000	$-4,0 \cdot 10^{-8}$	$6,1 \cdot 10^5$
50 „	$5,4 \cdot 10^5$	157	213 000	$-1,1 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^2$
30 „	$5,4 \cdot 10^5$	157	213 000	$-2,1 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^0$
20 „	$5,4 \cdot 10^5$	156	212 000	$-2,8 \cdot 10^{-1}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$
15 „	$5,4 \cdot 10^5$	154	209 000	-1,1	$2,3 \cdot 10^{-2}$
12 „	$5,3 \cdot 10^5$	150	204 000	-2,3	$1,0 \cdot 10^{-2}$
9 „	$5,2 \cdot 10^5$	138	188 000	-5,1	$4,7 \cdot 10^{-3}$
6 „	$4,9 \cdot 10^5$	125	170 000	-11	$2,1 \cdot 10^{-3}$
3 „	$4,3 \cdot 10^5$	81	118 000	-25	$9,7 \cdot 10^{-4}$
1 „	$3,5 \cdot 10^5$	35	47 000	-42	$5,7 \cdot 10^{-4}$
50 m	$2,9 \cdot 10^5$	2,9	4 000	-55	$4,4 \cdot 10^{-4}$
0 „	0	0	0	-120	$2,0 \cdot 10^{-4}$

Algunos de estos datos se encuentran representados en las figuras 365 y 366. De ellos se deduce que la mayor variación de los elementos eléctricos se produce en las

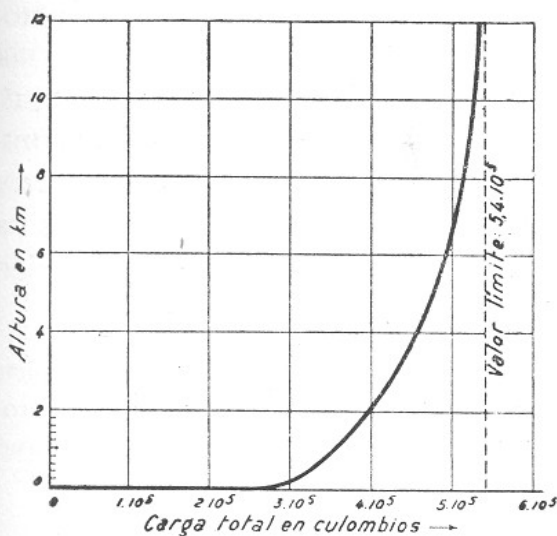


FIG. 365. — Carga eléctrica de la atmósfera, desde la superficie hasta el límite de la troposfera.

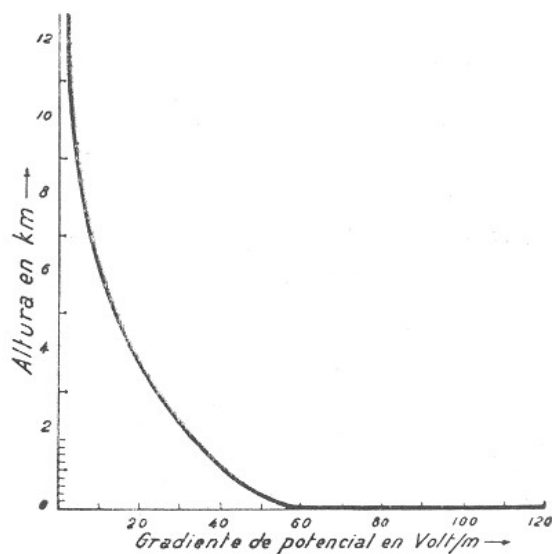


FIG. 366. — Disminución del gradiente de potencial eléctrico dentro de la troposfera.

bajas capas atmosféricas. En los primeros 50 m de aire que cubren el suelo se encuentra la mitad de la carga eléctrica de la atmósfera.

La corriente positiva que llega a la superficie estaría en condiciones de "neutralizar" la carga negativa de la corteza terrestre en sólo 40 minutos de tiempo. Esta posibilidad es contrarrestada por la *afluencia* incesante de electricidad negativa a la superficie de la Tierra, que se produce durante las tormentas, en forma de rayos.

**290. Representación gráfica del campo eléctrico.** — La variación de la intensidad de la fuerza de atracción de la carga negativa de la Tierra se representa mediante *superficies equipotenciales*. Estas super-

ficies unen todos los puntos del espacio en que la intensidad de la atracción es la misma.

La tierra es buena conductora de electricidad; en consecuencia, su carga eléctrica se diluye uniformemente por su superficie, de manera

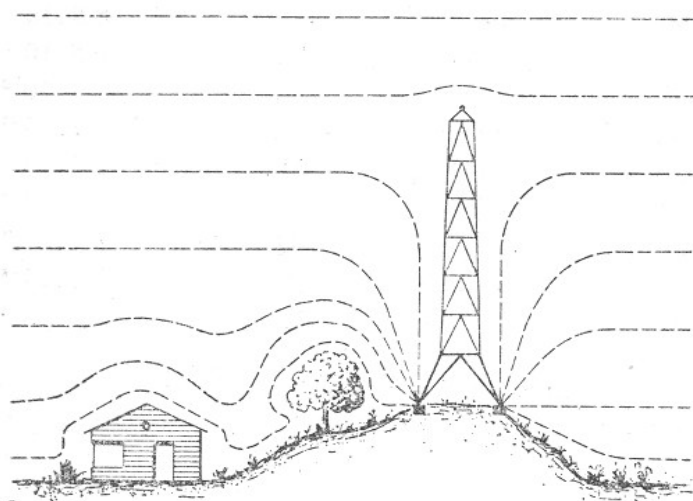


FIG. 367. — Representación esquemática del campo eléctrico de la atmósfera por medio de "superficies equipotenciales". La antena reposa sobre aisladores.

que la tensión resulta la misma en cualquier parte de ella. La superficie de la Tierra es, por esta razón, una superficie equipotencial.

Para una representación precisa, por supuesto, hay que tener en cuenta la "superficie real" de la Tierra, formada por los accidentes topográficos y por todos los objetos "buenos conductores" que existen sobre la misma, como ser: plantas, árboles, edificios y construcciones en general. Las superficies equipotenciales se amoldan a esta superficie real, adquiriendo forma geométrica definida recién a cierta altura (fig. 367).

Las superficies equipotenciales poseen una forma sencilla sólo durante el "buen tiempo". Viento, condensación del vapor de agua, precipitaciones, y en mayor proporción aún la convección térmica, originan grandes deformaciones en ellas, que pueden rematar en la producción de chispas eléctricas de 50 km de longitud.

### C) ELECTRICIDAD DE LAS NUBES Y TORMENTAS

**291. Generalidades.** — Entre los iones que se encuentran en el aire tienen particular importancia los *iones livianos*, formados por "partículas de vapor de agua". También entre estos iones prevalecen los de carga positiva. Por esta razón, en las gotas de agua, granos de hielo y copos de nieve que caen al suelo, predomina asimismo la carga eléctrica positiva.

Así es, en efecto. El 75 % de las lluvias generales, producidas por la lentísima elevación y enfriamiento de aire húmedo, acusa carga positiva. También la mayoría de las precipitaciones que se producen durante las tormentas tienen este mismo signo. Sólo en las nevadas no se nota preferencia por el mismo.

Para un examen más detallado de este fenómeno conviene partir de la suposición, bastante acertada, de que todos los productos de condensación se encuentran originariamente en un estado eléctrico neutro. Esto facilita la búsqueda de las fuerzas que pueden originar la separación de las electricidades y efectuar su concentración en determinadas partes de las nubes y tormentas, y su precipitación con definidas características eléctricas.

**292. Separación de las electricidades.** — La separación de las electricidades contenidas en los productos de condensación, especialmente en las gotas de agua, puede producirse de varias maneras.

a) Las gotas de agua son influenciadas por la carga negativa de la corteza terrestre, de manera que la carga positiva ocupa su parte inferior y la negativa la superior. La velocidad de su caída depende, desde luego, de su tamaño. Durante la caída, las gotas grandes, pesadas, alcanzan a las pequeñas, livianas. Cuando la gota alcanzada es relativamente pequeña, menor de 1/2 mm, nada particular sucede; las gotas se unen, sin mayor variación en su estado eléctrico. Pero cuando es grande, debido a la violencia del choque, de la parte superior de la gota chocante se desprenden pequeñísimas gotas cargadas de electricidad negativa, por lo cual

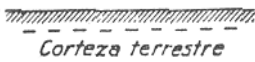
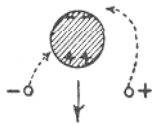
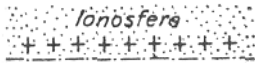


FIG. 369. — Según C. T. R. Wilson, una gota absorbe, durante su caída, más iones negativos que positivos, cargándose en consecuencia con electricidad negativa.

la gota unida acusa carga positiva (fig. 368). Las gotitas desprendidas siguen flotando en el aire, o son elevadas por las corrientes aéreas, mientras que las gotas unidas prosiguen su caída. De esta manera, la carga eléctrica positiva se concentra progresivamente en la parte baja de la nube, y la negativa, en la parte alta.

Este proceso, descubierto por J. ELSTER y H. GEITEL en 1885, permite explicar la carga positiva de las lluvias generales, pero no la formación de los potentes campos eléctricos de las tormentas, por lo que su valor es relativo.

b) Según C. T. WILSON, una gota polarizada capta durante su caída más iones negativos que positivos, cargándose, por esta razón, en medida creciente con electricidad negativa.

Los pormenores de este proceso serían los siguientes: Los iones negativos son "atraídos" por la carga positiva de la gota, concentrada en su parte inferior; sus trayectorias se

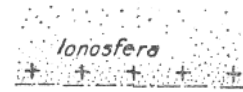


FIG. 368. — Al chocar dos gotas de agua durante su caída, de la chocante se desprenden pequeñísimas gotas, con carga eléctrica negativa.

cada vez mayor carga negativa. El hecho de que la mayoría de las precipitaciones acuse carga positiva y no negativa aconseja, sin embargo, no sobrestimar el valor de esta teoría.

c) Si suponemos que la carga negativa ocupa la superficie de la gota, y que la positiva está concentrada en su interior, entonces, al desprenderse de la misma pequeñísimas gotas, éstas le quitarán carga negativa, de manera que principiará a acusar carga positiva (fig. 138). Este desprendimiento se realiza durante la *pulverización de la gota*, producida por el viento fuerte, turbulento.

El descubridor de este fenómeno fué P. LENARD, en 1915, quien explicó, basándose en el mismo, la formación de "electricidad en cascadas". En la tablilla siguiente indicamos las características que debe tener el viento para que se realice la pulverización.

Diámetro de la gota:	Velocidad para la sustentación:	Velocidad para la pulverización:	Oscilación necesaria:
2,5 mm	6,4 m/sec	20,0 m/sec	13,6 m/sec
3,0 "	6,9 "	17,6 "	10,7 "
3,5 "	7,4 "	15,8 "	8,4 "
4,0 "	7,7 "	14,1 "	6,4 "
4,5 "	8,0 "	13,0 "	5,0 "
5,0 "	8,0 "	12,0 "	4,0 "
5,5 "	8,0 "	10,9 "	2,9 "

G. C. SIMPSON señaló, ya en 1909, que la pulverización de las gotas puede ser la causa de la separación de las electricidades dentro de las nubes, porque las gotitas desprendidas son arrastradas por el viento y dispersadas por toda la nube, mientras que los restos pesados permanecen en el lugar o prosiguen su caída. Por esta razón, la carga positiva llega a ocupar la parte baja de la nube, y la negativa, la parte alta.

d) El zumbido particular que se oye en los receptores de radio en la cercanía de nubes de hielo sugirió a W. FINDEISEN la idea de que en las mismas se opera una separación de electricidades. Según su modo de ver, durante la "adhesión" de las partículas de vapor de agua a los cristales de hielo y de nieve, estos últimos se cargarían positivamente, y durante el "despego", negativamente. Análogo sería también el efecto de la adhesión de gotitas de agua en estado sobrefusionado a los granos de hielo; éstos quedarían cargados positivamente.

La explicación de estos fenómenos se puede intentar basándola en la *tensión de contacto*, llamada también *efecto de Volta*, que se produce cuando dos metales son separados bruscamente. Como es sabido, los dos metales quedan cargados con electricidades de distintos signos. El agua se comportaría, pues, en sus diversas fases, como los metales.

FINDEISEN cree haber comprobado experimentalmente que durante los procesos mencionados se desprenden pequeñas *esquirlas de hielo* de los núcleos, de unos



0,02 mm de diámetro. La mayoría se separaría en estado eléctrico neutro; algunas entre ellas acusarían, sin embargo, una pequeña carga eléctrica, cuya tensión oscilaría entre 0 y 2 voltios. El signo de la carga parece depender de las temperaturas reinantes. Si la temperatura de la cáscara del grano es mayor que la del núcleo, las esquirlas se desprenderían con carga negativa, quedando el núcleo cargado positivamente; y a la inversa, cuando es menor, se desprenderían con carga positiva, quedando el núcleo cargado negativamente.

La eficacia de los tres procesos mencionados estaría representada por la relación 1:4:1000. La intensidad que tendría el último de ellos sería de  $3 \cdot 10^{-13}$  culombios por centímetro cuadrado y por segundo.

Es digno de mencionar, en esta oportunidad, que las esquirlas desprendidas bien pueden representar otros tantos núcleos de sublimación nuevos, hecho que podría explicar la sorprendente rapidez con que el agua pasa del estado gaseoso al estado sólido dentro de una nube muy fría.

e) Es muy probable que también la evaporación desempeñe un papel de importancia en esta separación de las electricidades. Como sabemos, en lo alto de la atmósfera la insolación es fuerte, el aire seco y los vientos intensos, factores todos que facilitan la evaporación. Ésta se verifica, ante todo, en la parte superior de los productos de condensación, donde se encuentra influenciada la carga eléctrica negativa. Por esta razón, las nubes altas, expuestas a los rayos solares, bien podrían adquirir carga eléctrica positiva.

También debajo del nivel de condensación se nota la influencia eléctrica de la evaporación. Las partículas que se desprenden de la parte inferior de las gotas, granos de hielo y copos de nieve en caída les quitan electricidad positiva, de manera que su carga negativa se acentúa cada vez más y más.

**293. Electricidad de las nubes.** — a) Las nubes cúmulus son originadas por las corrientes verticales poco intensas, que comúnmente no pasan la isoterma de  $-10^\circ$  y están formadas exclusivamente por pequeñas gotas de agua que, al cruzar en su caída el nivel de condensación, se evaporan rápidamente. Por esta razón se las llama *nubes de buen tiempo* (fig. 370). En esta clase de nubes no se verifica una separación de las electricidades. El reducido tamaño de las gotitas y la poca intensidad de las corrientes ascendentes no consigue realizarlo. En consecuencia, las "nubes de agua" no poseen cargas eléctricas diferenciadas.

b) Si, al contrario, las corrientes verticales son intensas, la nube en

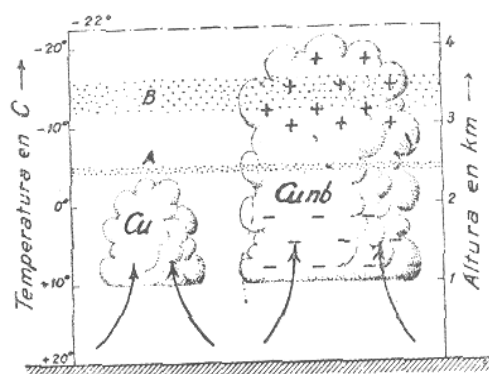


FIG. 370. — El cúmulo de "buen tiempo", formado por gotitas de agua, no acusa cargas eléctricas diferenciadas. El cúmulo nimbo, "tormenta incipiente", formada por cristales de hielo, tiene ya cargas diferenciadas, pero es todavía eléctricamente inactivo. A y B representan capas aéreas con núcleos de sublimación.

formación atraviesa ya la isoterma de  $-10^{\circ}$ . En este caso puede haber sublimación de vapor de agua y, por esta razón, formación de cristales de hielo y de nieve, que, como recordamos (§ 161), facilitan la formación de grandes gotas de agua, capaces de llegar al suelo en forma de un chaparrón. Nubes de tales características pueden llamarse, por esta razón, *tormentas incipientes* (fig. 370).

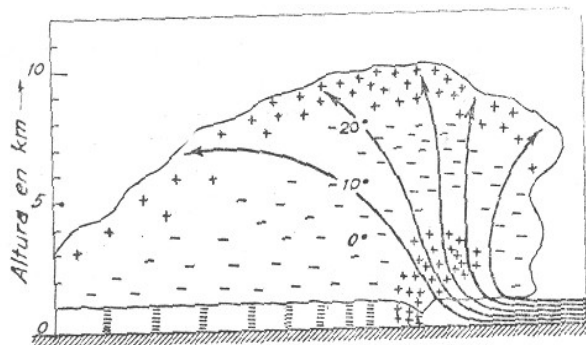


FIG. 371. — Distribución de las cargas eléctricas en una nube de tormenta, según las observaciones de Simpson y Scrase.

La extensión vertical de las tormentas incipientes, el tamaño de los productos de condensación que contienen y la intensidad de las corrientes aéreas que las atraviesan son todos factores que permiten ya la separación de las electricidades, pero **no todavía** en la medida necesaria como para producir truenos y relámpagos. Se trata, pues, de nubes cúmulonimbus, eléctricamente aún inactivas.

La separación de las electricidades se efectúa de tal manera, que en la parte superior de la nube queda concentrada la carga positiva, y en la parte inferior, la carga negativa. Esta distribución puede ser atribuida: en la parte alta de la nube, a la influencia de la evaporación, y en la baja, a la adhesión de los iones negativos a las gotitas de agua en caída, según la teoría de WILSON.

**294. Electricidad de las tormentas.** — Si el aire que se eleva del suelo es muy caliente y muy húmedo, y propicio el gradiente térmico existente en el espacio, las corrientes ascendentes pueden alcanzar una velocidad de hasta 35 m/sec. En este caso, la cantidad de vapor de agua eliminado resulta grandísima, y la nube formada, altísima. Las gotitas de agua arrastradas por las corrientes verticales, al atravesar la isoterma de  $-22^{\circ}$  se evaporan rápidamente, en beneficio de los cristales de hielo existentes, o simplemente se adhieren a los mismos, aumentando así su peso. Al debilitarse las corrientes principia la caída de estos granos de hielo, y con ello la separación de las electricidades. Los campos eléctricos que se forman durante este proceso llegan a ser tan fuertes, que dan motivo a descargas eléctricas que percibimos como truenos y relámpagos. Desde este momento la nube queda transformada en una *tormenta*. En consecuencia, la tormenta es una nube cúmulonimbus eléctricamente activa.

La distribución de las electricidades en una nube de tormenta está representada en la figura 371. La parte alta de la misma posee carga

positiva; la media, carga negativa, y la baja, nuevamente carga positiva. Para la explicación de esta distribución se dispone de dos teorías:

a) La TEORÍA DE SIMPSON, que se basa en el efecto de LENARD antes descrito, o sea que si una gota de agua es pulverizada, las gotitas desprendidas llevan carga negativa, quedando el resto de la gota cargada positivamente. La separación de las electricidades la efectúan el viento y la gravedad. La parte positiva queda concentrada en la parte baja delantera de la nube de tormenta, mientras que la negativa es dispersada en la parte restante.

En la figura 372 está representado detalladamente este proceso. Como se ve, el aire penetra en la nube desde el lado derecho. Las corrientes ascendentes alcanzan su máxima intensidad, más de 8 m/sec, en el espacio designado con la letra A, disminuyendo luego su ímpetu. A través de este espacio no puede caer, pues, ninguna gota; el viento es demasiado fuerte para ello. Por eso las trayectorias de las gotas están desviadas. La pulverización de las mismas se efectúa en

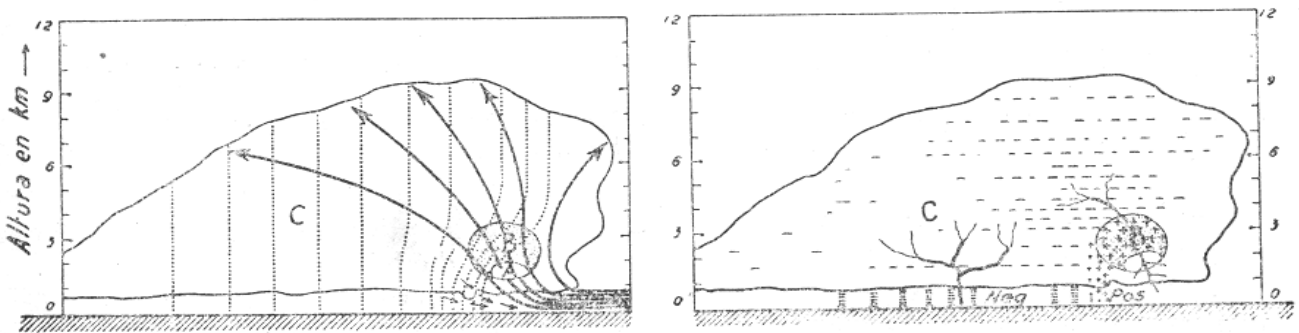


FIG. 372. — Separación de las electricidades en una nube de tormenta, según Simpson.

el espacio B, que llamaremos “corazón de la tormenta”. Las gotitas despegadas, cargadas de electricidad negativa, son arrastradas inmediatamente por los vientos y esparcidas por toda la nube, espacio señalado con la letra C. Los restos de las gotas, un tanto pesados y cargados positivamente, permanecen más o menos en el mismo lugar, crecen nuevamente, por adhesión de vapor de agua, y aprovechando las pausas del viento prosiguen su caída hacia la tierra. Las precipitaciones que caen de la parte delantera de la tormenta acusan, por esta razón, carga positiva; las que caen de la parte trasera, carga negativa.

Combinando esta teoría con el efecto de la evaporación se obtiene un cuadro de la distribución de la electricidad dentro de una nube de tormenta, tal como resulta de la observación.

b) La TEORÍA DE FINDEISEN Y WICHMANN, que supone que de los granos de hielo en caída se desprenden esquirlas, cargadas de electricidad negativa. Estas esquirlas, debido a su reducido peso, quedarían flotando en el espacio, mientras que los granos de hielo, considerablemente más pesados y en continuo crecimiento, prosiguen su caída. De esta manera, la carga eléctrica positiva se acumularía en la “capa baja” de la tormenta, comprendida entre el nivel de condensación y

la isoterma de  $0^{\circ}$ , y la carga negativa, en la "capa media", entre las isotermas de  $0^{\circ}$  y  $-10^{\circ}$ .

Los mismos investigadores tratan de explicar también la carga positiva de la "capa superior", pero la explicación carece de la necesaria sencillez para que pudiera considerarse verídica. Nada extraño sería que también en este caso el efecto eléctrico de la evaporación supliera las deficiencias de la teoría.

La figura 373 muestra la distribución de las electricidades dentro de una nube de tormenta, según estos investigadores. La parte izquierda representa una sección transversal, y la parte derecha, una sección longitudinal a través de la misma.

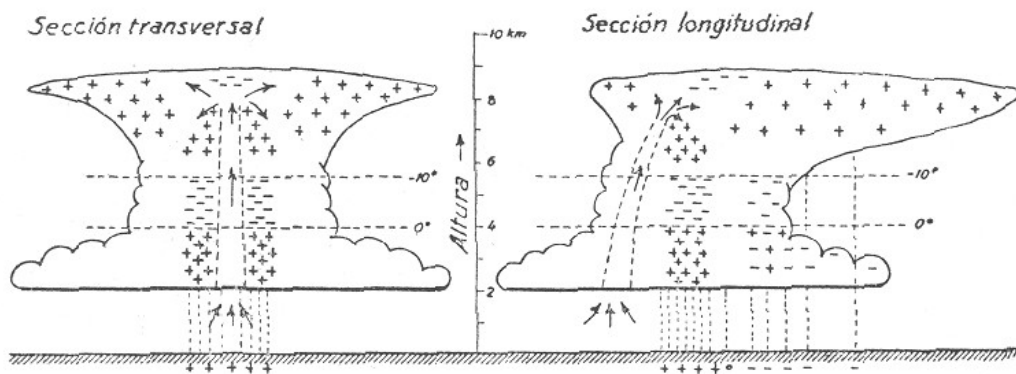


FIG. 373. — Separación de las electricidades en una nube de tormenta, según H. Wichmann.

Como se deduce del tono de esta descripción, la explicación del estado eléctrico de las nubes y de las tormentas es un capítulo débil de la meteorología. Disponemos de varias teorías al respecto, es verdad, pero desconocemos todavía el grado de certeza de ellas. Hacen falta más observaciones directas del estado eléctrico de las tormentas, desde el momento de su formación hasta su extinción, antes de poder inclinarse por alguna de ellas.

#### D) DESCARGAS ELÉCTRICAS

**295. Descargas silenciosas.** — El suelo está cubierto de infinidad de objeto en punta, tales como los pastos, plantas y árboles, y también las piedrecitas y granos de arena. Por eso la distribución de su carga eléctrica es muy desigual, siendo especialmente favorecidas, en cuanto a densidad, las puntas de los objetos. Cuando en lo llano el "gradiente de potencial" alcanza un valor de 150 volt/cm, la repulsión entre los electrones que ocupan las puntas es ya tan grande que puede comenzar el desprendimiento de ellos. La intensidad de la descarga así iniciada se estima, término medio, en  $10^{-10}$  amperios/cm<sup>2</sup>.

Estas descargas, a pesar de desempeñar un papel de importancia en el régimen eléctrico de la atmósfera, no son percibidas por la vista ni por el oído, porque los electrones desprendidos no alcanzan a ser acelerados en medida apreciable por el campo eléctrico circundante. Por eso se las llama *descargas silenciosas*.

De esta manera "silenciosa" actúan también, de continuo, las puntas de los *pararrayos*. Sin embargo, la eficacia de los mismos para neutralizar cargas eléctricas presentes en la atmósfera no supera mayormente el efecto que produce cualquier planta o árbol.

**296. Fuego de San Telmo.** — Cuando la tensión eléctrica en lo llano llega a los 1 000 volt/cm, los electrones se desprenden ya de las puntas de los objetos con mayor facilidad, y son considerablemente acelerados por el campo eléctrico existente; de manera que cuando chocan contra alguna molécula de aire pueden ya afectar su enjambre de electrones, sacando de sus órbitas a unos y deformando las órbitas de otros. Los electrones libertados son a su vez acelerados y pueden repetir este mismo proceso, mientras que los electrones de las órbitas deformadas, al volver a sus órbitas normales, emiten una energía que es percibida por nuestra vista como una onda luminosa. De este modo, en las puntas de los mástiles y los *pararrayos* se observa a veces un penacho de luz rojo violeta, llamado *fuego de San Telmo* (fig. 374). La intensidad de esta especie de descarga se estima en  $10^{-4}$  amperios/cm<sup>2</sup>, o sea un millón de veces mayor que la de las descargas silenciosas.

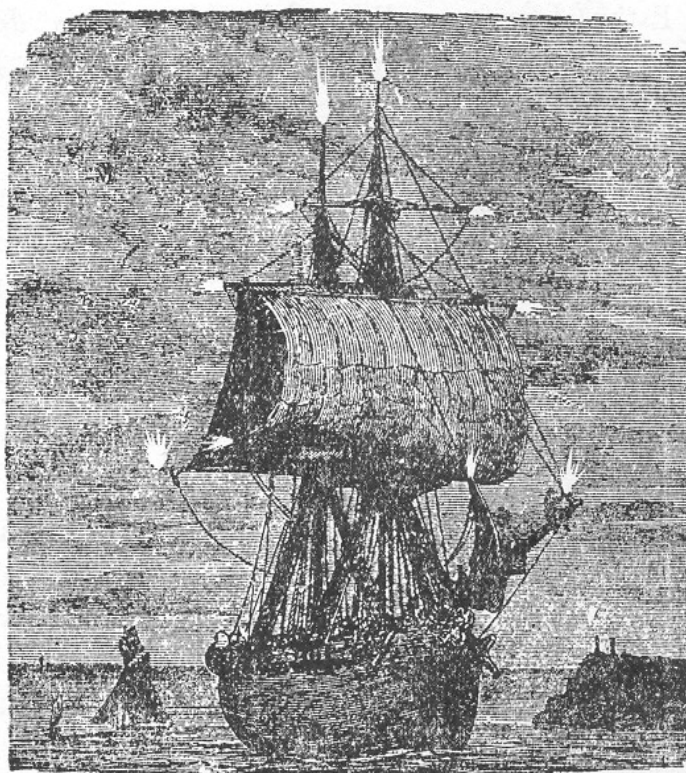


FIG. 374. — Fuego de San Telmo, en las puntas de los mástiles.

**297. Luz de los Andes.** — La luminosidad de las descargas silenciosas crece a medida que disminuye la densidad del aire, ya que entonces los electrones pueden ser acelerados más fuertemente, antes de que choquen con alguna molécula de aire y la ionicen. Por esta razón en las altas montañas, cubiertas de infinidad de objetos en punta, pueden producirse descargas del estilo del fuego de San Telmo, en escalas sumamente grandes, con una luminosidad que alcanza kilómetros de altura y que se repite a cortos intervalos.

Este fenómeno, conocido por *luz de los Andes*, se observa también,

en épocas secas, en las serranías de Córdoba, siendo de la clase de descargas silenciosas. A él se debe la ausencia de sombras en lo alto de los Andes, así como la claridad uniforme de sus campos de nieve.

**298. Relámpagos de calor.** — Durante el verano, con frecuencia se observa que una nube de tormenta se ilumina repentinamente, sin que se vea rayo alguno o se perciba un trueno. Esto sucede cuando en la nube ha ocurrido una descarga silenciosa. Que tales descargas acaecen de veras es cosa comprobada por el análisis espectral, que de los relámpagos y rayos suministra un “espectro de rayas”, en tanto que de las descargas silenciosas un “espectro de bandas”.

Estas descargas, llamadas *relámpagos de calor*, acusan mucha semejanza con la luz de los Andes. También la producción de ellas está en relación con la poca densidad del aire en la altura, desempeñando el papel de “objetos en punta” los cristales de hielo y nieve, y las gotitas de agua estiradas por la influencia del fuerte campo eléctrico existente. El relámpago de calor es, pues, un fuego de San Telmo en infinitud de realizaciones simultáneas, en la parte culminante de una nube de tormenta.

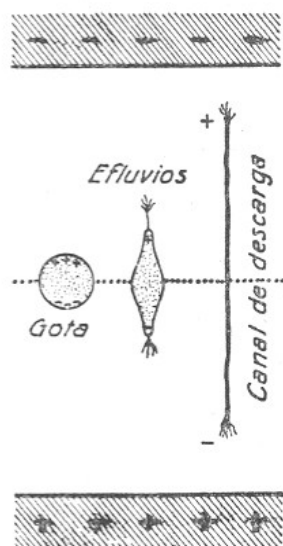


FIG. 375. -- Iniciación de una descarga eléctrica con la rotura de una gota de agua.

**299. Rayos y relámpagos.** — En las nubes de tormenta, entre el “corazón de la tormenta”, cargado de electricidad positiva, y el resto de la nube, cargada de electricidad negativa, e igualmente entre el suelo y la nube, ocasionalmente se forman campos eléctricos extremadamente fuertes (fig. 372). En el momento en que el gradiente de potencial llega a unos 10 000 volt/cm se inicia la descarga; las dos masas eléctricas, de distinto signo, fluyen alternativamente, en direcciones opuestas, con tenden-

cia a compensarse y neutralizarse. Todo este violentísimo proceso lo percibimos como un brillante trazo de luz, acompañado de un fuerte chasquido, seguido de un prolongado retumbo. Cuando la descarga se produce dentro de la nube la llamamos *relámpago*, y cuando ocurre entre la nube y tierra, *rayo*.

La descarga se inicia en alguna gota situada en la superficie de separación de las dos cargas eléctricas (fig. 375). Debido a la atracción que estas cargas ejercen, la gota se alarga, concentrándose en uno de sus extremos su carga positiva, y en el otro la negativa. Cuando el gradiente de potencial alcanza el valor antes mencionado, comienza el desprendimiento de los iones positivos en una dirección, y de los iones negativos, consistentes en simples electrones, en otra. Los electrones desprendidos son fuertemente acelerados por el campo eléctrico existente. La gran velocidad

que así adquieren los capacita para "ionizar" las moléculas de aire que encuentran en su camino. Los electrones libertados durante los choques llevan adelante el efecto ionizador, preparando de esta manera el futuro *canal de descarga*. Este proceso se propaga en una dirección preponderante, pero con infinitas ramificaciones que no son perceptibles a simple vista ni captadas por los aparatos fotográficos. El futuro canal de descarga adquiere de este modo una forma arborescente. Los tentáculos que penetran en un ambiente poco propicio se extinguen; los que encuentran un ambiente favorable, se alargan y robustecen. El aumento del gradiente de potencial en el frente de estas ramificaciones, debido a la deformación de las superficies equipotenciales, facilita el avance del proceso, y con ello la prolongación del canal (figs. 376 y 377).

Ya durante este proceso de ionización se efectúa el *relleno progresivo del canal* en formación, desplazándose —debido a la atracción ejercida por los campos eléctricos existentes— los iones positivos hacia uno de los extremos, y los iones negativos hacia el otro, afluyendo además, cuando el caso lo requiere, para completar la carga, una cantidad adecuada de electricidad de los campos eléctricos existentes. Este proceso de relleno es la segunda fase de la descarga. Se la suele denominar *descarga preparatoria*.

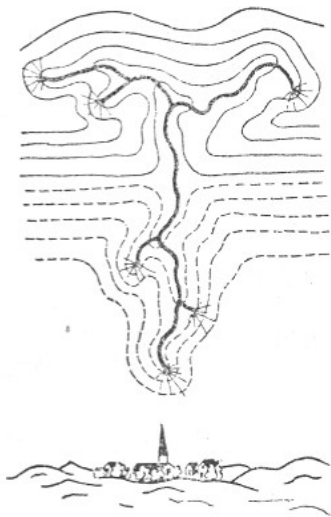


FIG. 377. — Campo eléctrico en las proximidades de una descarga eléctrica, representado por superficies equipotenciales.

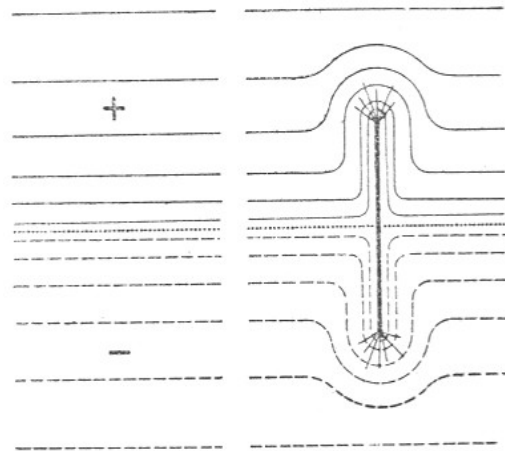


FIG. 376. — El "canal de descarga", lleno de iones, ejerce el mismo efecto sobre las superficies equipotenciales que un buen conductor: las deforma, produciendo a la vez un incremento del gradiente de potencial en sus frentes.

En el momento en que el canal de descarga toca el suelo se produce la *descarga principal*, en dirección contraria a su crecimiento, o sea de la tierra a la nube. La masa eléctrica, desprendida de la corteza terrestre, que invade el canal de descarga, neutraliza su carga eléctrica. Este proceso es frecuentemente obstaculizado por la elasticidad del aire del ambiente, que trata de "estrangular" el canal de descarga recientemente abierto. La consecuencia es que todo este proceso de descarga puede repetirse varias veces. Hubo un caso en que se observaron 27 descargas sucesivas por el mismo canal.

Terminada la descarga se percibe todavía, por breve tiempo, una débil luminosidad, en el lugar que ocupaba el canal, como consecuencia de la *recombinación de los iones*, fenómeno que se va extinguiendo a medida que se neutraliza la carga restante en el mismo.

Estas cuatro fases de que se compone el proceso de descarga que llega a afectar la superficie de la tierra, se distinguen nítidamente en la figura 378, obtenida por medio de un aparato fotográfico rotativo. Los intervalos de la escala de tiempo que figura en la misma representan sólo cienmilésimas de segundo, lo que ilustra acabadamente acerca de la extraordinaria

velocidad con que se desarrollan los fenómenos parciales. La descarga se inicia con el desprendimiento de los electrones que ionizan el aire, preparando

así el futuro canal de descarga. El progresivo avance de este proceso y el sucesivo relleno del canal está señalado con las letras A a G, esta última ya en la superficie de la tierra. Terminada la preparación de este canal, la descarga principal se produce en dirección contraria, de G a A, o sea "de la tierra a la nube", en forma intermitente. Después de esta descarga principal se percibe todavía, por breves instantes, una débil luminosidad, que se extingue a medida que se neutraliza la carga eléctrica que llena el canal.

La figura 379 representa otra descarga de interés. La parte superior muestra la fotografía obtenida por medio de una cámara fija, y la inferior, con una cámara giratoria. La punta de la torre y la chimenea que se ven en la parte

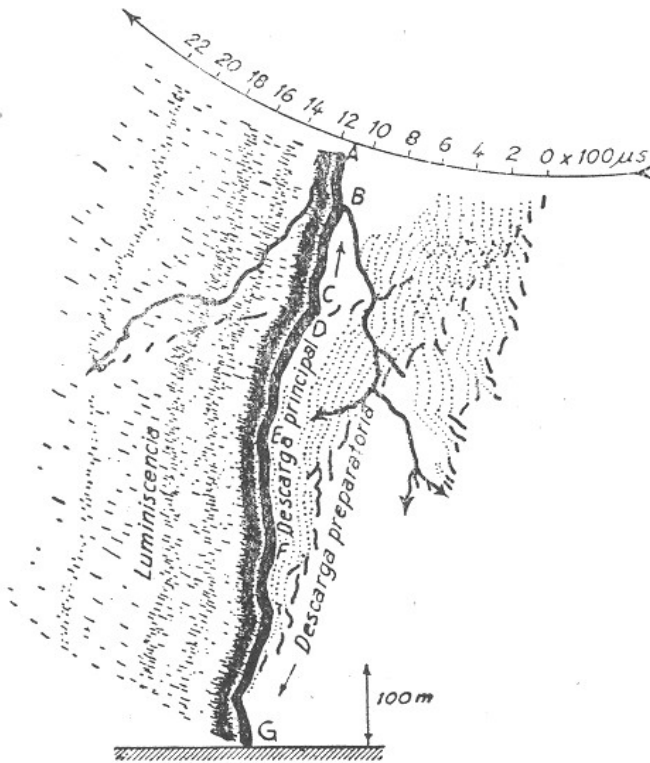


FIG. 378. — Estructura de una descarga eléctrica, revelada por una cámara fotográfica en rotación, según Schonland.

superior, y que reaparecen con cada nueva descarga en la parte inferior, permiten individualizar las distintas descargas. El número de éstas llegó a 6. Como se deduce de la figura, la ramificación del rayo principal en la parte superior es sólo aparente: la primera descarga se efectuó por la rama derecha del canal, y las cinco restantes, por la rama izquierda.

He aquí algunos *datos complementarios*:

Las descargas eléctricas se desarrollan, por lo general, en tiempo brevísimo, que no pasa de algunos milésimos de segundo, y con una velocidad elevadísima, que se estima en unos 2 000 km/sec. La longitud del canal de descarga, o sea del relámpago, suele ser de 2 km. Un relámpago de 10 km de longitud es ya poco frecuente, y uno de 50

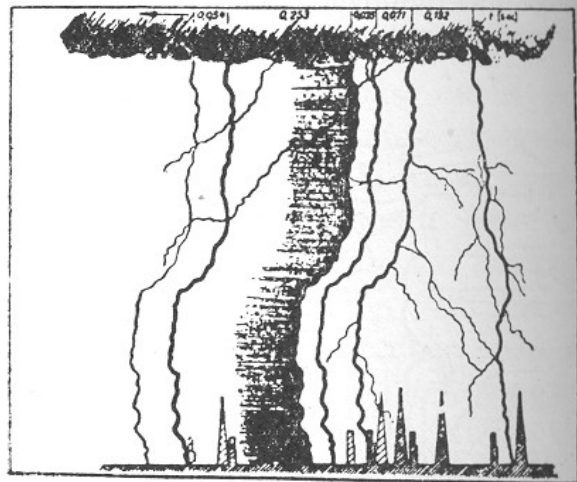
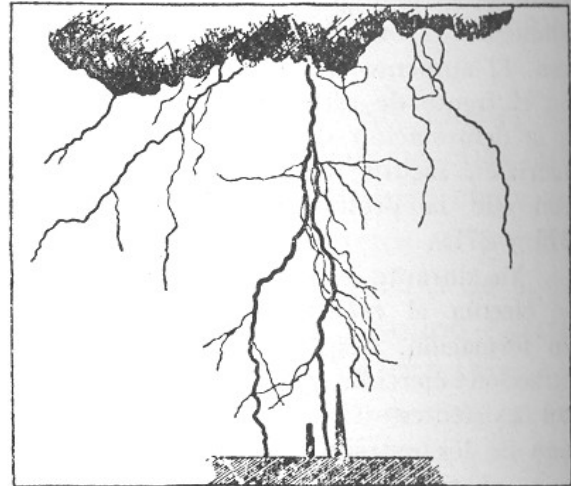


FIG. 379. — Una misma descarga eléctrica, fotografiada por Walter con una cámara fija y otra rotativa. La descarga principal consta de seis descargas parciales.



km, una excepción. El diámetro del canal suele tener unos centímetros, nunca más de medio metro. La masa eléctrica desplazada por una descarga se estima, término medio, en 10 culombios, y en casos excepcionales, en 100 culombios. La diferencia de potenciales entre los extremos de un relámpago depende, desde luego, de la longitud del mismo y de la altura en que se produce. Cuanta mayor es la altura, menor es esta diferencia. Un relámpago de 2 km de longitud, supuesto sin ramificación alguna, requiere una diferencia de potenciales de 30 millones de voltios; uno de 8 km de longitud, 60 millones. La intensidad de la corriente eléctrica producida por la descarga suele ser de 10 000 amperios.

El brillo del relámpago es la luz que emiten las moléculas de aire, excitadas durante el proceso de ionización, al volver a su estado normal. Su inevitable acompañante, el trueno, es el movimiento vibratorio de la masa aérea circundante, debido a la compresión y subsiguiente dilatación del aire, afectado por el proceso de ionización. La luminosidad del relámpago se propaga a través del espacio a razón de 300 000 km/sec; su acompañante el trueno, sólo a razón de 333 m/sec. La distancia a que se inició la descarga puede ser determinada, por esta razón, con facilidad. Cada 3 segundos de diferencia de tiempo entre el relámpago y la percepción del trueno equivale a 1 km. Los truenos se oyen hasta una distancia de 3 leguas, o sea aproximadamente 15 km.

EJEMPLO: Supongamos que en una tormenta se produce un relámpago de  $L = 2$  km de longitud cada segundo, durante una hora entera. ¿Cuál es la *energía liberada*, si suponemos que en cada relámpago se neutraliza, en un lapso  $t = 0,001$  segundo, una masa eléctrica  $Q = 10$  culombios, y si admitimos que la diferencia de potenciales eléctricos entre los dos extremos del relámpago es de  $V = 30 \cdot 10^6$  voltios?

La intensidad de la descarga es  $I = Q : t = 10 : 0,001 = 10\,000$  amperios. El trabajo realizado,  $Tr = Q \cdot V = 10 \cdot 30 \cdot 10^6 = 3 \cdot 10^8$  julios. Recordando que  $3,6 \cdot 10^6$  julios representan 1 kilowatt-hora, resulta que la *energía de una descarga* equivale  $3 \cdot 10^8 : 3,6 \cdot 10^6 = 83,33$  kwh. Si quisiéramos producirlo artificialmente y calcular su costo, resultaría el siguiente: Un kilowatt-hora cuesta actualmente \$ 0,60, de manera que cada relámpago costaría \$ 50, y las 3 600 descargas que se producen en la tormenta, \$ 180 000 en total.

Uno de los principales efectos de las descargas es la *generación de calor*. El equivalente calórico de un julio son 0,239 pequeñas calorías, *gcal*, de manera que la cantidad de calor producido en cada relámpago es  $C = Tr \cdot 0,239 = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,239 = 72 \cdot 10^6$  *gcal*. Esta energía se encuentra dispersada en el espacio que ocupa el relámpago. Si para el mismo suponemos una sección  $s = 10$  cm<sup>2</sup> y una longitud  $L = 2$  km, este espacio es  $E = s \cdot L = 10 \cdot 2 \cdot 10^5 = 2 \cdot 10^6$  cm<sup>3</sup>. En cada centímetro cúbico se encuentra, por consiguiente, una cantidad de calor  $c = C : E = 72 \cdot 10^6 : 2 \cdot 10^6 = 36$  calorías. Este valor, en la mayoría de los casos superado en las tormentas, explica la extrema peligrosidad de las descargas eléctricas, tanto para los seres vivos como para las materias inflamables o combustibles.

**300. Rayo rosario.** — La desaparición del rayo no es siempre instantánea. Su disolución se efectúa, a veces, con cierta anomalía, quedando

visibles, por un breve lapso, en los lugares de mayor resistencia eléctrica, masas luminosas de forma esférica. La ubicación de estas masas a lo largo de la línea que ocupaba el canal de descarga ha sugerido su denominación de *collar de perlas* o *rayo rosario*.

**301. Rayo globular.**— Luego de haberse producido una descarga eléctrica puede observarse a veces, por tiempo que no pasa de un minuto, una masa luminosa de forma esférica, llamada *rayo globular* o *bola de fuego*, que cruza lentamente el espacio. Su tamaño raras veces sobrepasa el de un melón. Si penetra en un recinto cerrado, sigue de preferencia el curso de la instalación eléctrica. En algunos casos estas masas desaparecen silenciosamente; en otros se disuelven acompañadas de un fuerte estampido. Se desconocen todavía los pormenores de su formación.

### E) DEFENSA CONTRA LAS DESCARGAS

**302. Particularidades de las descargas.**— La descarga eléctrica es un "río de iones". Este río fluye por el camino de menor resistencia, aprovechando los buenos conductores que encuentra en su camino.

Los electrones, igual que los iones de un mismo signo, se repelen. Por esta razón, si un conductor posee una sección suficientemente grande, la descarga pasa por su superficie, sin afectar su interior.

El avance de la descarga se efectúa por medio de efluvios, de 5 a 7 m de longitud. Si uno de los efluvios encuentra un buen conductor, la descarga lo toma por camino.

Los *efectos de la caída de un rayo son múltiples*, la mayoría de ellos peligrosos para los seres vivientes y dañino para las obras humanas. Su principal peligro reside en el calor que se engendra en la descarga y en la extrema violencia de ellas.

*Efectos mecánicos.* El rayo destroza los malos conductores, parte los troncos y ramas de los árboles, agrieta los edificios y lanza objetos a grandes distancias.

*Efectos térmicos.* El rayo funde los buenos conductores de sección insuficiente, incendia los árboles, bosques y edificios, e inflama las sustancias propicias. Si el rayo cae en terreno arenoso, funde los granos. Éstos, al aglutinarse, forman tubitos alargados, conocidos con el nombre de "fulguritas".

*Efectos magnéticos.* Toda descarga eléctrica produce en su proximidad un intenso "campo magnético", que modifica la imanación de las brújulas, magnetiza las piezas de acero y daña las partes vitales de los relojes y cronómetros.

*Efectos químicos.* Las moléculas de oxígeno,  $O_2$ , son partidas por el rayo en átomos,  $O_1$ . Éstos, a su vez, se adhieren a las moléculas existentes, formando así conjuntos nuevos, triatómicos,  $O_3$ , llamado ozono, con fuerte olor a azufre. Ade-

más, las descargas eléctricas combinan el oxígeno, nitrógeno y vapor de agua que hay en la atmósfera, produciendo ácido nitroso y ácido nítrico;  $N_2 + 2O_2 + H_2O = NO_2H + NO_3H$ . Estos ácidos son recogidos por la lluvia. Una parte del ácido nítrico se combina con el amoníaco,  $NH_3$ , y forma una sal, nitrato de amoníaco,  $NO_3NH_4$ . De este modo, el nitrógeno del aire es transformado en alimento de los vegetales, y por intermedio de éstos, también en alimento de los animales.

*Efectos fisiológicos.* El rayo puede ocasionar la muerte al ser viviente cuyo cuerpo ha empleado como camino. Si el efecto no es mortal, por lo menos ocasiona fuerte congestión cerebral y derrames sanguíneos interiores, acompañados siempre de quemaduras de la piel. Es también frecuente la quemadura de los vestidos, como también una ceguera pasajera de las víctimas.

*Efectos psicológicos.* El sistema nervioso de algunas personas que se encuentran dentro de la zona de una fuerte tormenta eléctrica es a veces alterado. A menudo ese trastorno se traduce en un verdadero temor por los fenómenos que acaecen a su alrededor.

**303. Pararrayos.** — Para la protección de las viviendas humanas y de las construcciones en general se usa el *pararrayos*, inventado por BENJAMÍN FRANKLIN en 1752. Consiste de una barra de hierro de 1 a 3 m de longitud, galvanizada en su extremo, instalada en el lugar más alto del edificio y que, mediante un cable de acero de 1 cm<sup>2</sup> de sección, comunica con una gran placa metálica, hundida en tierra húmeda.

Un pararrayos protege el edificio sobre el cual está colocado únicamente dentro de un radio de unos 7 m, extensión que alcanzan los efluvios, por medio de los cuales el rayo busca camino. Si un efluvio alcanza un "hilo" de la descarga silenciosa que emana del pararrayos, el rayo se dirige hacia el pararrayos y por él va hacia la tierra (fig. 380). Si la descarga se produce a mayor distancia que la dicha, el pararrayos puede no ejercer influencia alguna. Los edificios que han de defenderse de las descargas eléctricas deben contar con un pararrayos cada 10 m. Éstos deben estar conectados entre sí, y comunicar por varios conductos apropiados, por el camino más directo, con tierra húmeda.

**304. El hombre y el rayo.** — Todo cuerpo buen conductor que sobresalga de la superficie de la tierra puede ser considerado un *pararrayos*, o sea un objeto por el cual "tienden" a pasar las descargas eléctricas de una tormenta. El cuerpo humano es buen conductor de electricidad; de ahí el gran peligro en que se encuentra durante una tormenta.

Para *disminuir* este peligro es aconsejable:

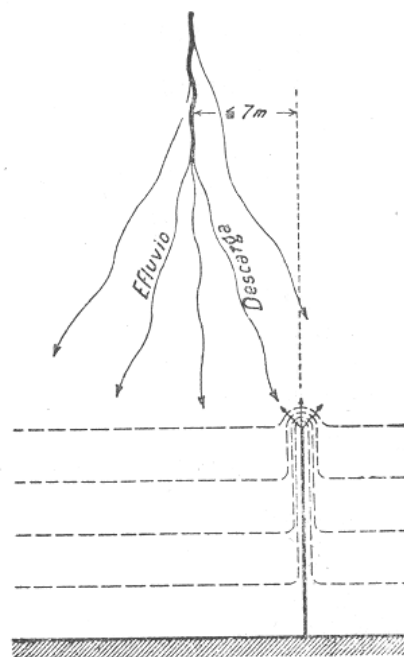


FIG. 380. — Un pararrayos defiende contra una descarga eléctrica sólo dentro de un radio de 7 m, espacio que atraviesan los efluvios, por medio de los cuales el rayo busca el camino de menor resistencia.

- a) permanecer durante la tormenta en habitaciones cerradas;
- b) quitarse de encima todo objeto metálico;
- c) alejarse de los buenos conductores;
- d) calzar zapatos con suela de goma.

En el campo conviene:

- e) evitar las alturas;
- f) no guarecerse debajo de los árboles;
- g) preferir los bajos del terreno;
- h) tumbarse en el suelo;
- i) no llevar encima objeto metálico alguno.

Relativamente seguros nos encontramos en automóvil, ómnibus o tren.

La cercanía de los árboles es peligrosa, porque éstos atraen a los rayos, y como carecen de capacidad para conducir a tierra toda la descarga, parte de ésta

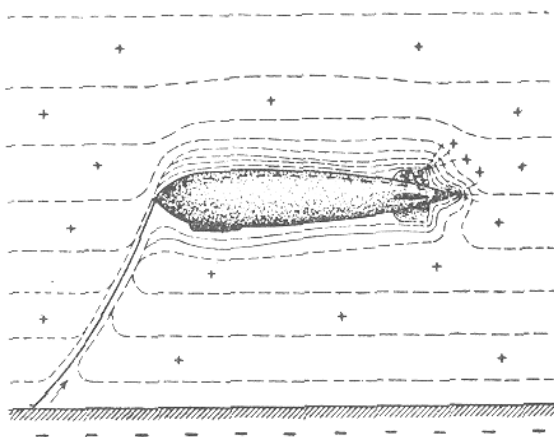


FIG. 381. — El dirigible, en el momento de ser amarrado, se carga de electricidad negativa. Ésta, en unión con la tensión incrementada cerca de las puntas del timón, puede originar descargas eléctricas peligrosas.

pasa a tierra directamente, atravesando el aire y el cuerpo humano si la persona se encuentra debajo del árbol. Además, el gran calor que produce el rayo volatiliza el agua que contiene la corteza y dilata el aire encerrado en las cavidades, lo que produce un violento desprendimiento de astillas del tronco, y trozos de la corteza.

Efecto desagradable producen también las descargas que se producen en la proximidad del hombre, debido a la fuerte influencia eléctrica que ejercen sobre su organismo.

### 305. El avión y la tormenta.

— El campo eléctrico de la atmósfera, tanto en “tiempo bueno” como en “tiempo tormentoso”,

tiene particular importancia para las aeronaves.

Durante el vuelo, el avión choca contra una infinidad de iones. Entre éstos prevalecen los de carga positiva. Por esta razón, el avión llega a tierra con carga positiva. Pero el suelo posee carga negativa. Al tocar el avión se puede producir, por consiguiente, una *chispa*. La mayor chispa observada hasta hoy es de 3 m de longitud.

Es particularmente peligroso el *amarre de los dirigibles* si éstos están cargados con gas hidrógeno. En el momento de amarrar, la carga positiva es llevada a tierra, quedando cargado el dirigible, en consecuencia, negativamente. Desde ese momento el dirigible semeja un gran pararrayos (fig. 381). Si el tiempo es tormentoso, y esto ocurre cuando el gradiente de potencial es muy elevado, en las cercanías de las puntas del timón pueden producirse tensiones peligrosas, capaces de motivar una descarga eléctrica. Así se produjo el incendio del gran dirigible *Hindenburg*, en el aeropuerto de Nueva York, el 8 de julio de 1936.

Durante el vuelo, el avión y su antena forman un extenso conductor, que deforma el campo eléctrico cercano. Esta deformación no tiene mayor importancia cuando el tiempo es bueno, o sea cuando las superficies equipotenciales son paralelas a la superficie del suelo (figura 382). Es distinto cuando se vuela a través de una tormenta, a la altura del "corazón" de la misma. A este nivel, las superficies equipo-

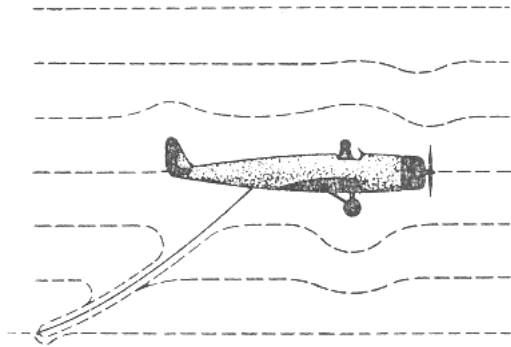


FIG. 382. — El avión en el campo eléctrico de la atmósfera en "tiempo bueno". La deformación de las superficies equipotenciales no tiene mayor importancia.

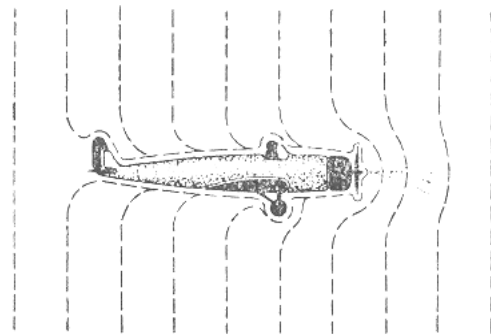


FIG. 383. — El avión en el campo eléctrico de una tormenta. La deformación de las superficies equipotenciales produce tensiones críticas en la punta de la hélice.

tenciales son perpendiculares a la superficie del suelo (fig. 383). Por esta razón, la tensión eléctrica en la punta de la hélice puede aumentar en forma peligrosa, y motivar la iniciación de la descarga. La descarga pasa a través del avión, hecho no exento de peligro para el aviador, el avión y su instrumental.

El camino que toma la descarga depende de la posición casual del avión. Si vuela en dirección al "corazón de la tormenta", o debajo de ella, el rayo penetra en el avión por la punta de la hélice y sale por la antena. Si vuela a un costado del corazón de la tormenta, el rayo penetra por un ala y sale por la otra o por la antena. Y finalmente, si se vuela por encima del corazón de la tormenta, el rayo entra por la antena. Si ésta es fina la funde, sin pasar por el avión mismo;

si es gruesa, atraviesa el avión y sale por un ala o por la hélice (fig. 384). Si se vuela en formación, la misma descarga puede atravesar varios aparatos sucesivamente.

Los efectos del paso de una descarga a través de un avión son múltiples. El rayo descompone la brújula, daña la instalación radiotelegráfica y

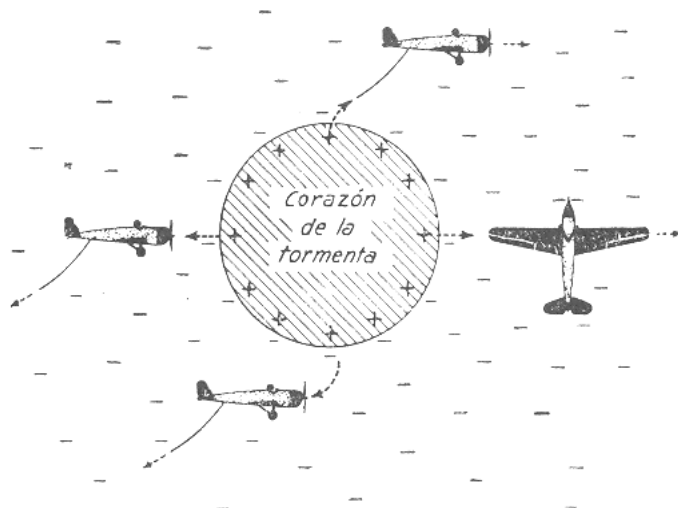


FIG. 384. — Caminos que toma una descarga eléctrica a través de un avión que vuela en la cercanía del corazón de la tormenta.

funde la antena si no es suficientemente gruesa. La fulminación del aviador, si se trata de un avión cerrado y bien pantallado, no es probable. Muy peligrosa es la ceguera momentánea del piloto, producida por la luz ultravioleta de la descarga. Tampoco es despreciable el efecto psicológico de la descarga, consistente en un trastorno pasajero, aunque peligroso, del aviador, cuando se vuela a gran velocidad y a poca altura, y cuando se está expuesto a fuertes embarcadas.

Volar a través de una tormenta es peligroso, no sólo por la posibilidad de ser alcanzado por un rayo, sino también por la fuerte turbulencia que reina en la misma y que somete la estructura del avión a un esfuerzo extraordinario. Es aconsejable "bordear" la tormenta, o "sobrevolarla", si su frente es demasiado amplio. Si esto no es posible, conviene aterrizar. Cuanto mayor sea la altura a que se cruce una tormenta, menor es la probabilidad de ser alcanzado por un rayo. Conviene volar a poca velocidad y con la antena recogida.