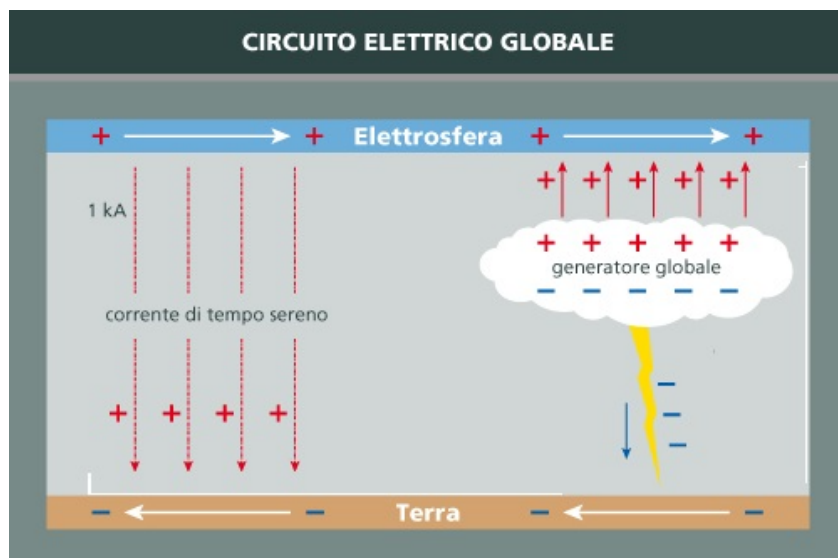


Ciclo elettrico atmosferico

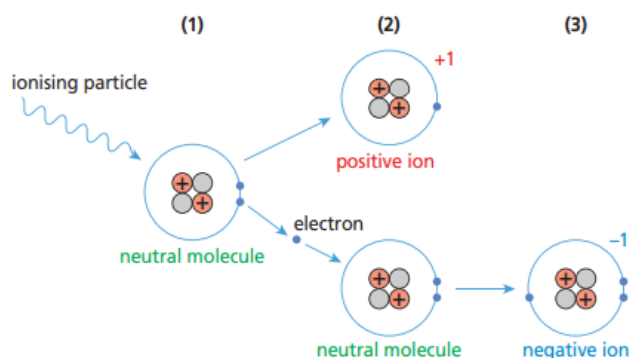
Circuito elettrico globale:



L'atmosfera terrestre è dotata di un campo elettrico, rivolto verso il basso (in caso di tempo sereno), massimo in prossimità del suolo $E_0 = 130 \text{ V/m}$, e minimo in alta quota, a livello della ionosfera (o elettrosfera 80-100 km).

In particolare, la terra ha una carica netta negativa ($Q = 5.8 \times 10^5 \text{ C}$), mentre la ionosfera ha una carica netta positiva.

Cariche elettriche nell'atmosfera si formano per ionizzazione principalmente di molecole di ossigeno ed ozono, da parte di radiazione ionizzante dal sole (UV, X-ray) e particelle cariche (raggi cosmici o vento solare). Nella ionosfera, la densità è sufficientemente bassa che gli elettroni liberi sopravvivono alla cattura da parte di ioni. Diversamente dal resto dell'atmosfera, la ionosfera è un buon conduttore di elettricità dato il grande numero di ioni positivi ed elettroni liberi.

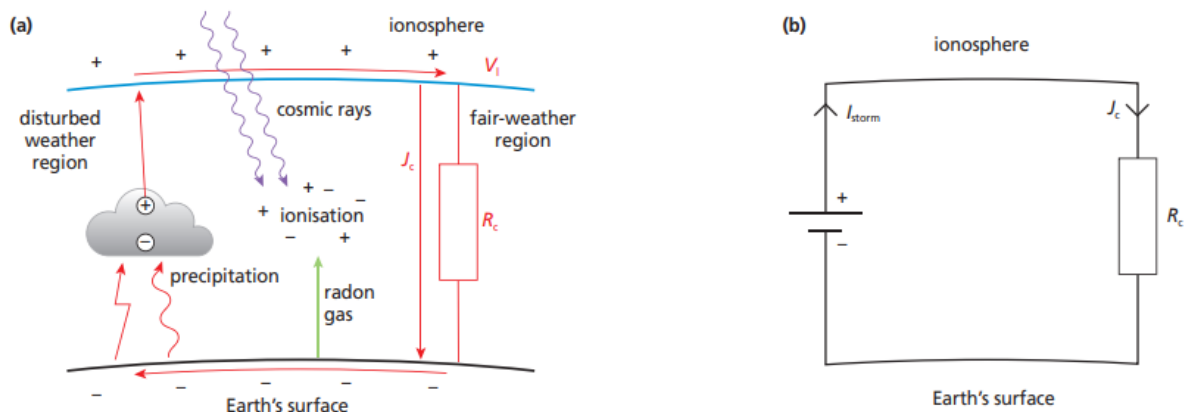


La superficie terrestre risulta carica negativamente; questo avviene per effetto dell'induzione elettrostatica dovuta alla carica positiva netta della ionosfera.

Possiamo approssimare il sistema ad un condensatore sferico, con la lastra positiva data dalla ionosfera, e quella negativa data dalla superficie terrestre, con una differenza di potenziale $V = 240 - 300 \text{ kV}$, che decresce linearmente con l'altezza.

Questa differenza di potenziale, dato che l'atmosfera non è un isolante perfetto, instaura un moto di ioni dall'alto verso il basso, per cui le cariche positive tendono ad annullare le cariche positive sulla terra (corrente di bel tempo - fair-weather current). In particolare la densità di corrente dovuta a questo moto di cariche è compresa tra $J = 1\text{-}2 \times 10^{-12} \text{ A/m}^2$, corrispondente ad una corrente di scarica di circa $I = 1700 \text{ A}$, che comporterebbe, se non compensato da qualche meccanismo di carica, ad una scarica del condensatore in una decina di minuti.

A mantenere la differenza di potenziale circa costante sono le tempeste di fulmini (thunderstorm), che trasferiscono cariche negative alla superficie terrestre. A questo circuito di cariche viene dato il nome di "Circuito Elettrico Globale", che può essere schematizzato come in Figura, dove la resistenza nella zone di bel tempo è di $\sim 150 \Omega$



Una delle prove più convincenti sulla correttezza del meccanismo proposto per la formazione del circuito elettrico globale, sono dovute alle misure di campo elettrico fatte dalla nave Carnegie, che ha navigato gli oceani nel mondo tra il 1909 ed il 1929. I dati

della Carnegie mostrano che le variazioni giornaliere di campo elettrico nelle zone di bel tempo sono indipendenti dalla posizione della nave (i.e. erano le stesse su tutto il globo). Questo ci dà un'indicazione sulla natura globale del ciclo elettrico atmosferico e delle sue variazioni giornaliere. Inoltre, il campo elettrico di bel tempo ha un minimo intorno alle 3:00 UT, ed un massimo intorno alle 19:00 UT (vedi linea blu grafico). Questo andamento è in ottimo accordo con la variazione giornaliera dei temporali a livello globale, suggerendo l'importante ruolo che hanno questi ultimi nel generare la corrente globale.

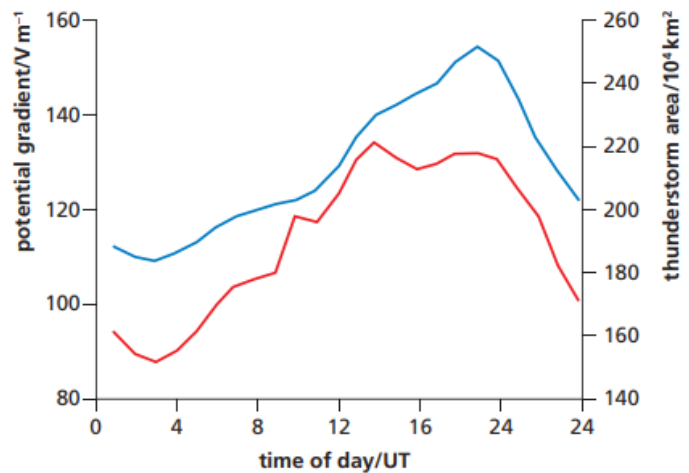
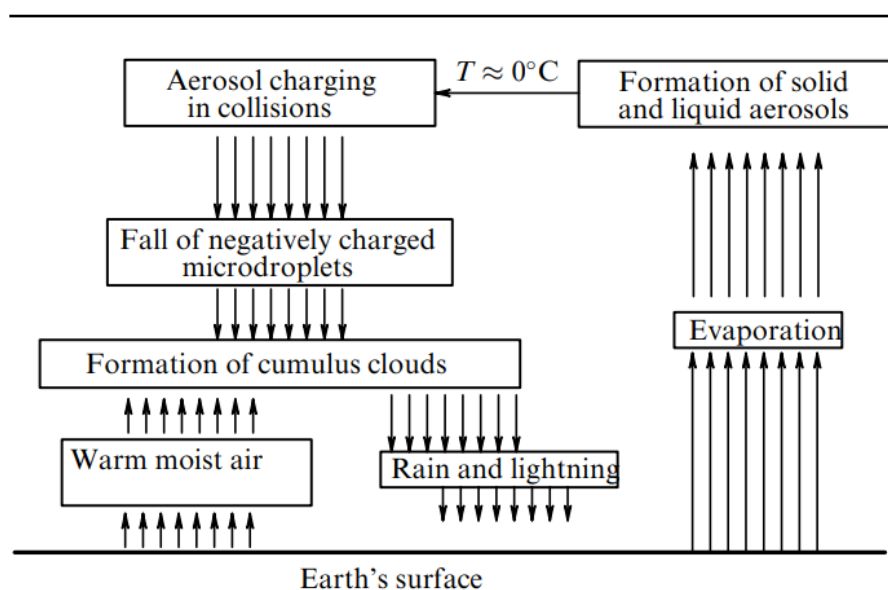


Figure 4 Standard daily variation in atmospheric electric potential gradient (electric field) as measured by the ship *Carnegie* (blue, left-hand axis) and global thunderstorm area (red, right-hand axis)

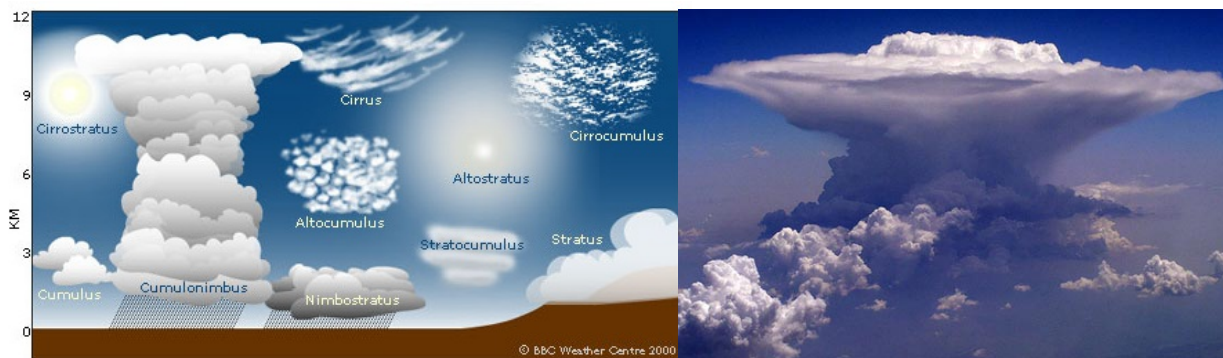
Formazione dei temporali:

Si verificano circa 50 scariche di fulmine ogni secondo sulla terra. Queste sono concentrate principalmente nelle aree continentali e costiere, mentre sugli oceani e nelle regioni polari sono più rari. I temporali si generano in seguito a rapidi movimenti ascensionali di aria calda e umida. Infatti, approssimativamente il 70% dei temporali



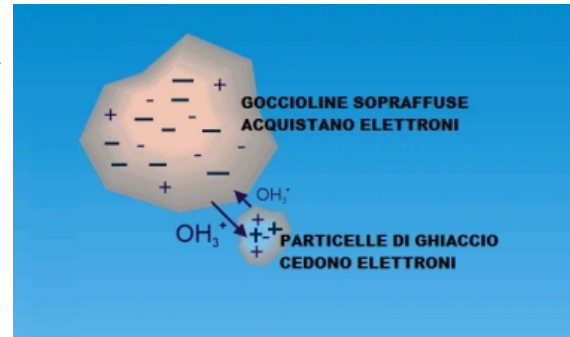
avviene nelle zone tropicali dell'Africa, Sud America e sud-est asiatico. Misure da satellite e da terra, mostrano che in ogni momento sono attive circa 1000 tempeste sulla terra. Ogni tempesta funge da generatore, che separa le cariche positive e negative. Le cariche positive in genere sono trasferite all'apice delle nubi temporalesche, mentre le cariche negative si accumulano alla base. Le cariche positive in cima fluiscono verso la ionosfera, facendole accumulare carica positiva. Contemporaneamente, le cariche negative alla base delle nuvole sono trasferite sulla superficie terrestre dai fulmini e dalla pioggia. Misure effettuate da aeroplani nelle regioni al di sopra delle tempeste hanno rilevato che ognuna di queste produce una corrente positiva ascensionale di circa 0.8 A. Considerando circa 1000 tempeste attive ogni istante globalmente otteniamo una corrente totale ascensionale di 800 A. In assenza di queste, si stima che la ionosfera si scaricherebbe in circa 15 minuti.

Nella maggior parte dei casi è la presenza dei cumulonembi nei temporali a creare la situazione più favorevole perché si verifichi un fulmine. Questo fenomeno elettrico può tuttavia avvenire anche in seguito a tempeste di sabbia, bufere di neve o nuvole di polvere vulcanica. Come qualsiasi altra nube, il cumulonembo inizia a formarsi dall'ascesa di aria calda e umida, ma in questo caso i moti d'aria sono così intensi che il cumulo continua a crescere verticalmente, tanto che la sua sommità può raggiungere la tropopausa (qui è costretta ad appiattirsi assumendo il caratteristico profilo ad incudine). A queste quote la temperatura è di alcune decine di gradi sotto lo zero, quindi la nube sarà formata da particelle di ghiaccio e goccioline soprafuse (goccioline liquide che pur con temperature negative non ghiacciano). Alla sommità del cumulonembo l'aria si raffredda e, divenuta più densa, si dirige verso il suolo con forti raffiche discendenti. È a questo punto che il temporale entra nello **stadio di maturità**, la sua fase di maggior potenza distruttiva. La turbolenza generata dalle correnti ascendenti e discendenti crea la separazione di cariche elettriche opposte e dunque lo sviluppo dei fulmini, come pure l'intensificarsi delle piogge.

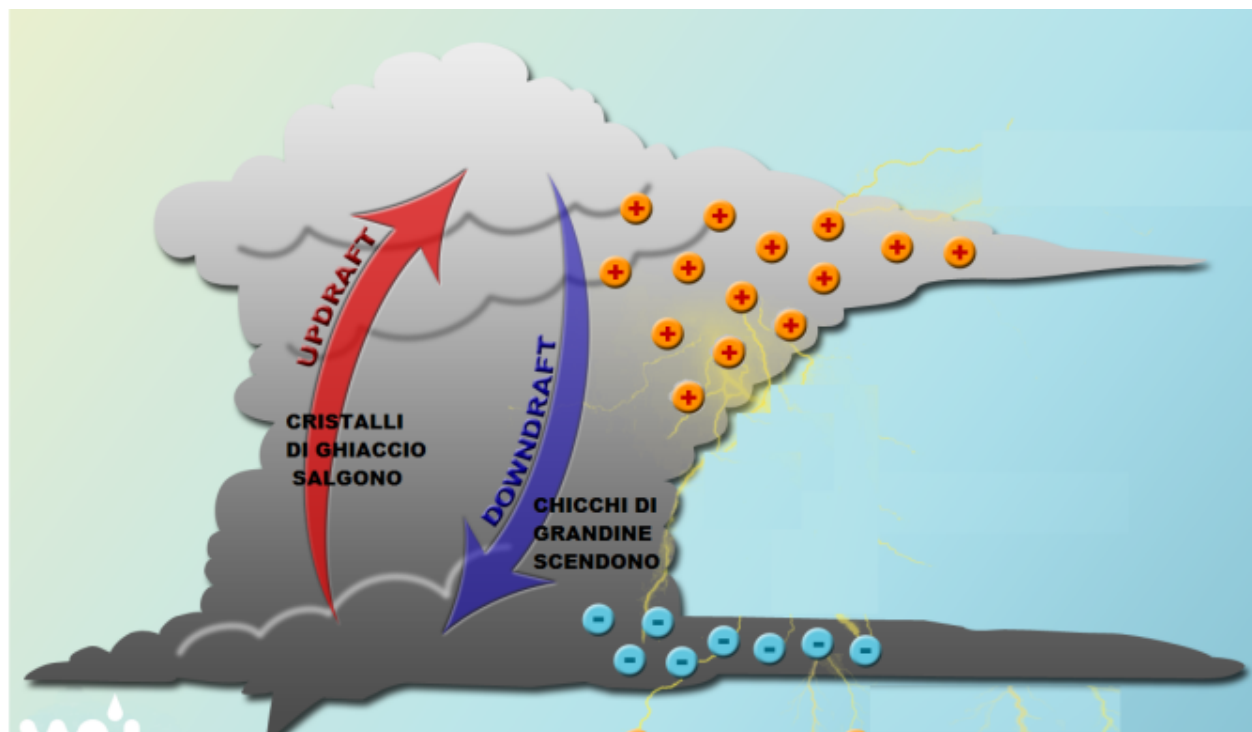


Le particelle di ghiaccio e le goccioline sopraffuse sono particelle diverse ma entrambe elettricamente neutre, ciascuna possiede cioè ugual numero di elettroni e protoni.

Correnti ascensionali di aria molto probabilmente causano una turbolenza che provoca una collisione reciproca tra i due tipi di particelle. Gli urti forniscono una quantità di energia cinetica sufficiente ad estrarre degli elettroni dalle particelle di ghiaccio; gli elettroni liberi vengono poi acquistati dalle goccioline sopraffuse.



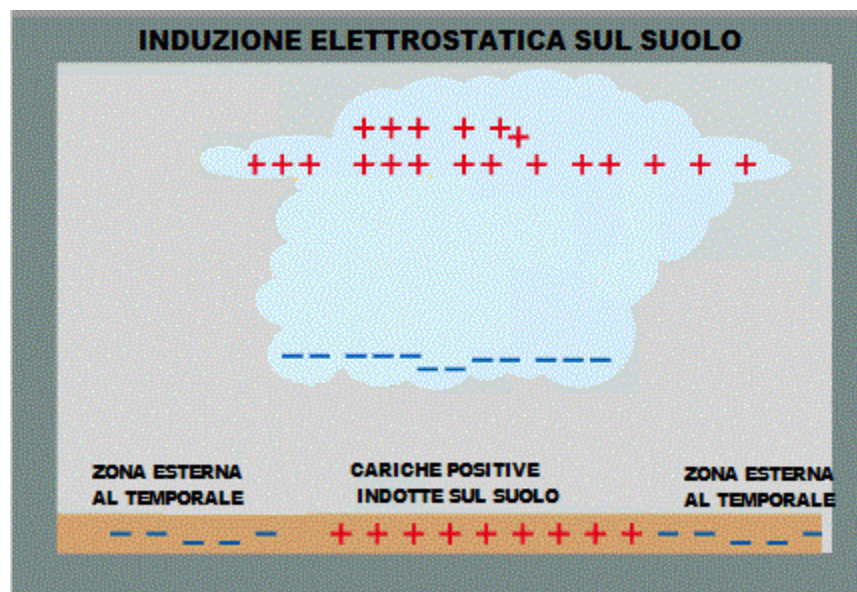
Si viene quindi a creare un'alterazione nella distribuzione delle cariche man mano che le particelle vengono messe in movimento: le particelle di ghiaccio cedendo un elettrone si caricano positivamente, assumeranno la forma di cristalli di ghiaccio con dimensioni più piccole, e, più leggeri, tenderanno a spostarsi verso la sommità della nube; le goccioline sopraffuse acquistando un elettrone si caricano negativamente, si trasformeranno in grandine, che, più pesante, scenderà verso la base della nube.



La nube risulta così formata da due poli di carica opposta, con una zona centrale di particelle ancora neutre; essa svilupperà perciò un comportamento analogo a quello di un condensatore: la sua sommità è come un'armatura carica positivamente, la base è

come un'armatura carica negativamente e la zona centrale rappresenta lo spazio tra le armature con campo elettrico uniforme. Quando si raggiungerà un valore limite di differenza di potenziale, in media $3 \times 10^6 \text{ V/m}$ (rigidità del dielettrico), sarà in grado di fluire una corrente di cariche tra le due armature, e dunque all'interno della nube.

La formazione di un cumulonembo altera la distribuzione di cariche sulla superficie terrestre. La presenza di cariche negative alla base del cumulonembo, induce un allontanamento degli elettroni concentrati sul suolo terrestre, respinti da cariche dello stesso segno. Si verifica perciò per tutta la superficie terrestre immediatamente sotto il cumulonembo la concentrazione di carica positiva, dovuta all'attrazione da cariche di segno opposto. Questa zona di cariche positive si sposta insieme alla nube, mentre la zona esterna resta carica negativamente.

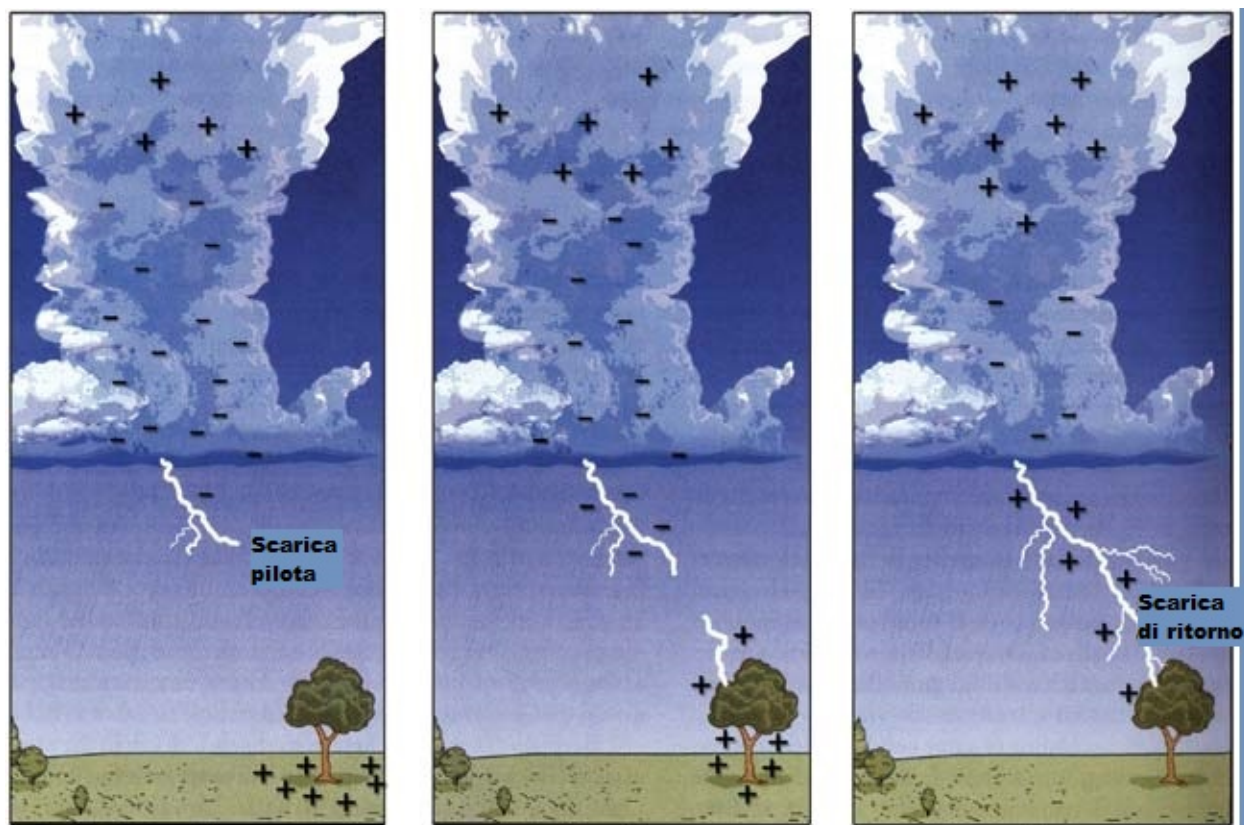


Fulmini:

I fulmini sono i processi elettrici più rilevanti nell'atmosfera terrestre. Queste scariche elettriche dovute all'accumulo di cariche sulle nubi possono avvenire sia tra la superficie e la nube (20-25%), o all'interno della stessa nube o nubi adiacenti (75-80%).

Nel caso di fulmini nube-suolo, sono le cariche negative che provocano un flusso di corrente elettrica discendente, poiché sono attratte verso il suolo in seguito alla differenza di potenziale tra la base della nube caricata negativamente e la carica

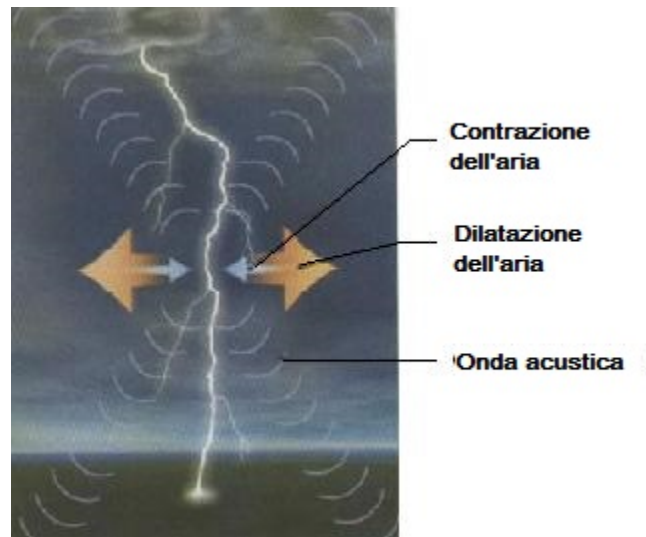
positiva del suolo sottostante. Nel momento in cui la scarica pilota (stepped leader) si avvicina al suolo, si ha una collisione tra cariche opposte che fa partire da terra una “scarica di ritorno”. Questa scarica di ritorno è caricata positivamente e parte solitamente da un oggetto particolarmente esposto come un albero. La scarica pilota è debolmente visibile; mentre la scarica di ritorno genera un lampo che illumina il canale ionizzato mostrandoci un percorso a zig zag più o meno ramificato.



Schematicamente le fasi di un tipico fulmine nube-suolo:

1. La scarica pilota - debolmente visibile - è guidata da un canale discendente: alcuni elettroni (carica negativa) spinti dal forte campo elettrico generato dalla nube, cominciano a scendere a zig-zag (percorrono un tratto di 30/50 metri, effettuano una pausa di poche decine di microsecondi, e poi percorrono un altro tratto, ecc... la velocità media risultante dell'avanzamento è di circa 10^5 m/s – corrispondente alla velocità di deriva degli elettroni sottoposti a questi campi elettrici). Questo processo di scarica si traduce in una serie di “colpi” e richiede un tempo dell'ordine del centesimo di secondo, riuscendo a formare un canale ionizzato lungo anche 8 km.
2. Il canale ionizzato può chiudersi in due modi differenti:

- a. in seguito alla formazione di un analogo canale di carica ionizzata di segno positivo, canale che si propaga dal suolo verso la nube (tipicamente sorge da punte o strutture isolate). Canali di questo tipo, chiamati canali ascendenti, possono incontrare effettivamente il canale discendente, aiutandolo così a chiudere il canale conduttore. Di solito la chiusura del percorso si ha a 20-100 metri dal suolo.
 - b. Oppure con il canale discendente che è abbastanza lungo da toccare terra senza incontrare prima un canale ascendente (questo avviene se la nube è sufficientemente carica)
3. Nel momento in cui il canale conduttore si chiude, esso può essere percorso da una corrente elettrica di ritorno: la “scarica di ritorno”. Essa si genera quando la scarica pilota tocca terra: cariche opposte hanno una collisione, che genera una forte scarica di cariche positive dirette verso la nube (normalmente la scarica nasce dal punto più alto da terra, come un campanile o un albero isolato). La velocità della scarica di ritorno è circa $1/3$ della velocità della luce.
- a. Il passaggio di corrente positiva comporta diversi effetti nel canale ionizzato:
 - b. essa fornisce un'energia tale da accelerare le particelle di aria ionizzata che convertono questa energia in energia luminosa. Il canale ionizzato fin qui è rimasto oscuro, ora viene illuminato generando il lampo, la classica striscia luminosa associata al fulmine.
 - c. essa fornisce un'energia cinetica alle particelle che viene trasformata in calore per effetto Joule: si alza bruscamente la temperatura e altrettanto diminuisce la densità dell'aria. Alla dilatazione segue un'ulteriore compressione. Questo brusco cambiamento origina un'onda di pressione che si propaga e che viene percepita come tuono. Il canale di carica ionizzato ha un diametro di qualche centimetro, mentre la temperatura raggiunge i 30.000 C° .



Il processo di scarica continua fino a quando tutte le cariche elettriche della nube sono state dissipate. Si hanno cioè nuove scariche che passano nel canale preesistente,

scendendo verso terra. Questo secondo processo deposita altra carica lungo il canale, esso è oscuro e viene chiamato dart-leader; di nuovo al raggiungimento della terra si avrà passaggio di corrente con un secondo illuminamento, e così via per due o più dart-leader; solitamente il processo è più veloce della scarica pilota.



Quando altre scariche usano il canale, producono una caratteristica luce intermittente molto rapida. Si considera il fulmine come una singola scarica, ma sono molto frequenti i casi in cui una serie di scariche in rapida successione vengono percepite dall'occhio umano quasi come un singolo fulmine di maggior durata.

Precisamente l'intervallo di tempo tra una scarica e l'altra può oscillare tra i 5 e i 500 millisecondi, e la serie nel complesso può durare anche 1,5 secondi.

La differenza di potenziale tra la base delle nubi ed il suolo è compreso tra 20-100 MV, e le scariche attraversano una distanza di 1-5 km. In media un fulmine trasferisce una carica di 20 C, suddivisa in 3-4 flash di corrente (dart-leader)

GRANDEZZA FISICA	VALORE
corrente elettrica	2 -200 kA (30kA in media)
temperatura elettronica	50.000 K
diametro del canale ionizzato	10-50 cm
Carica elettrica totale	5 – 10 C
differenza di potenziale	$1-10 \times 10^9$ V