

IL FENOMENO

DEL



Marina Bernardi

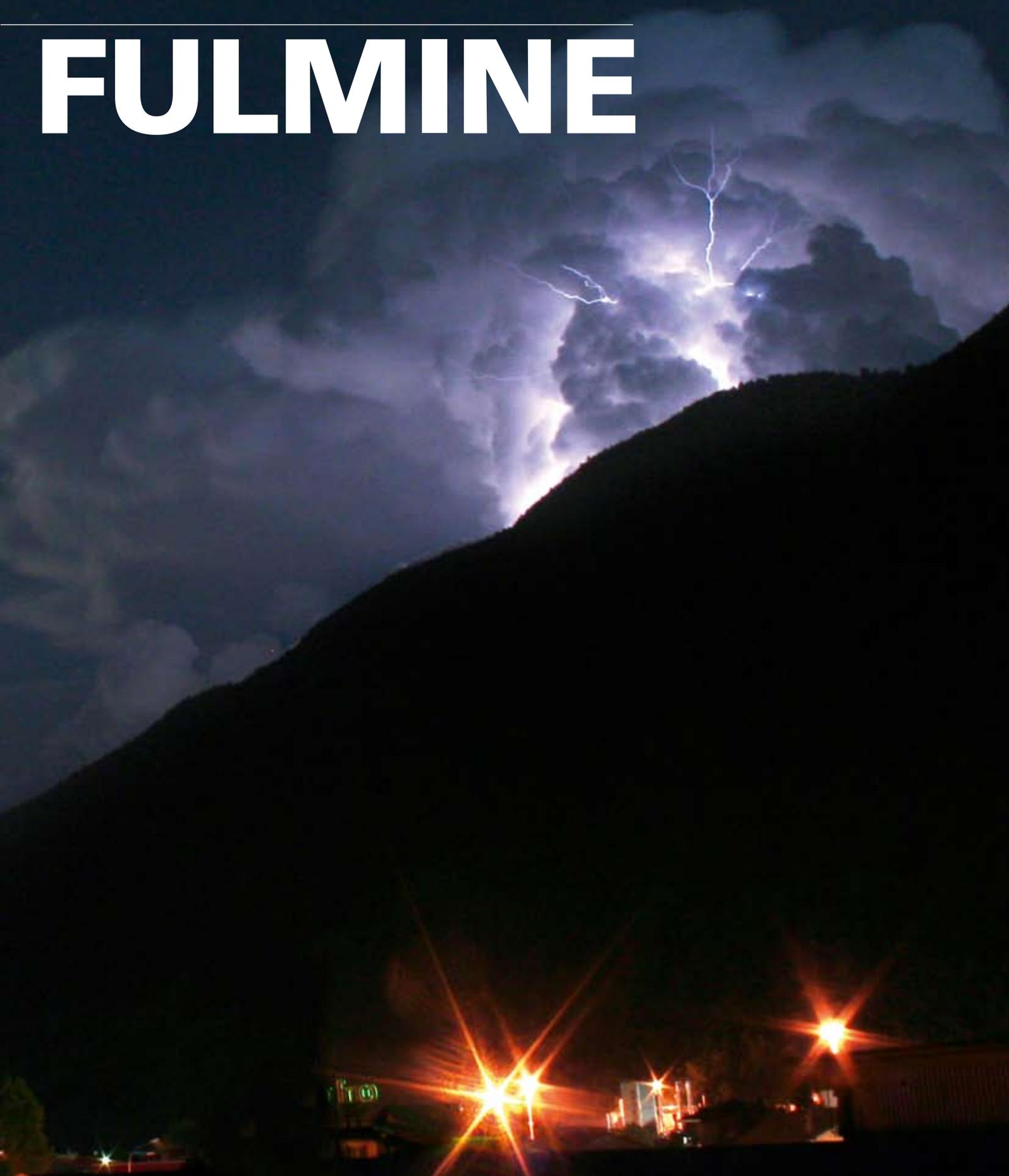
CESI - Centro Elettrotecnico
Sperimentale Italiano
via Rubattino 54, 20134 Milano
mbernardi@cesi.it

Il fulmine è da sempre uno dei fenomeni meteorologici più pericolosi per le attività umane in generale e per quelle all'aperto ed in montagna in particolare [1].

Molto spesso il fulmine viene considerato un corollario del più ampio fenomeno temporalesco ed allo studio di quest'ultimo, trattato da varie discipline scientifiche, ci si limita. In realtà il fulmine è un fenomeno complesso e necessita di competenze specifiche per essere analizzato e compreso. Il fulmine, la sua genesi e le sue caratteristiche sono stati perciò oggetto di studio da parte di specialisti, a partire dal '700 con i primi esperimenti sulle caratteristiche elettriche del fulmine. Oggi, grazie alle moderne tecnologie ed ai molti progressi nell'analisi di questo fenomeno, è possibile conoscere molte delle caratteristiche fondamentali del fulmine e persino seguire in tempo reale la presenza di scariche sul territorio.

Si cercherà qui di dare un quadro conciso delle caratteristiche dei fulmini, che possa essere una prima introduzione e, magari, uno stimolo all'approfondimento.

FULMINE





CIRCUITO ELETTRICO GLOBALE

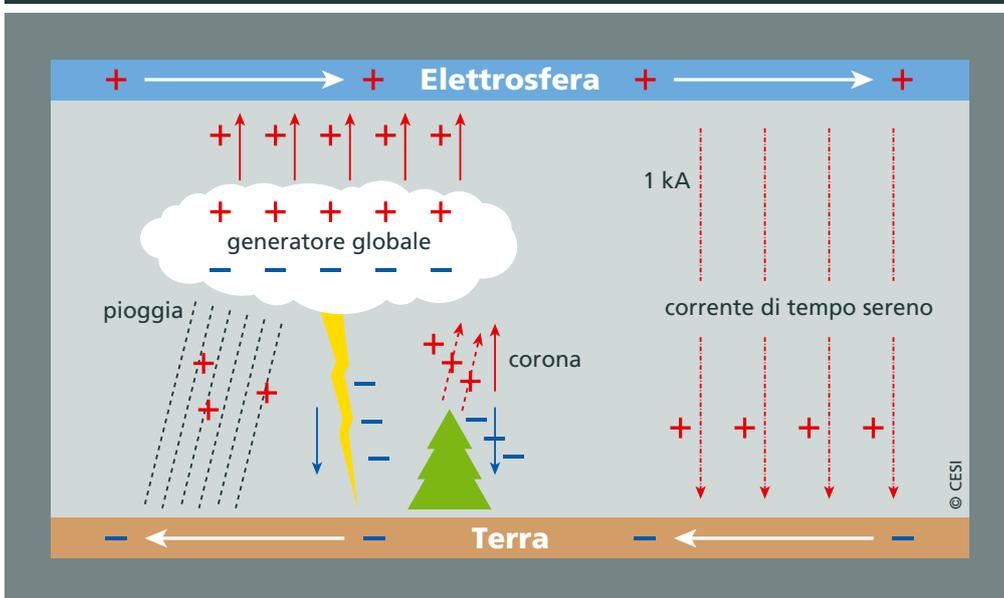


Fig. 1 **PILLOLE DI STORIA**

La storia degli studi sui fulmini inizia nel '700, con la scoperta della natura elettrica di questi da parte di Franklin e Dalibard [2]; si procede poi nell '800 con le misure di spettroscopia della scarica, che permettono, tramite la lettura delle lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica emessa dal canale di scarica luminoso, di valutare la temperatura del canale stesso, la densità ed il tipo di molecole presenti [3-4]. Nei primi del '900 misure con strumenti ottici [5-6-7] permettono di misurare i tempi di evoluzione del processo di sca-

rica. Si eseguono inoltre i primi esperimenti per le misure di corrente su torri.

Questi studi vengono eseguiti installando degli strumenti di misura (ad es. di carica e di corrente) presso una torre che, grazie alla sua altezza, è colpita di frequente da scariche di fulmine; le caratteristiche delle scariche che colpiscono la torre possono essere misurate con gli strumenti installati. Questa metodologia è stata ed è tuttora utilizzata in molti esperimenti e, tramite essa, negli anni '60 si sono ottenute le misure fondamentali di Berger e Garbagnati (Svizzera-Italia) [8-9] che

tuttora sono un riferimento internazionale. In contemporanea, nel corso del '900, si sviluppano gli studi delle caratteristiche della scarica e della formazione del leader (canale di carica ionizzata che innesca il fulmine) nei laboratori di alta tensione e potenza, ove si è in grado di riprodurre scariche simili ai fulmini in modo controllato. Anche in questo settore l'Europa e l'Italia sono all'avanguardia, con gli studi effettuati nei laboratori del gruppo Le Renardiere e del CESI [10-11]. Sempre nel '900 si ha la messa in opera dei primi rilevatori o contatori di fulmine, strumenti in grado di captare il segnale elettrico emesso dal fulmine e registrarlo [12], e dei primi esperimenti con razzi di innesco [13] (razzi lanciati verso la nuvola, che trascinano un filo collegato agli strumenti al suolo, lungo il quale passa la corrente del fulmine innescato). Negli anni '70/'80/'90 si sviluppano i sensori elettromagnetici a banda larga e si diffondono le reti di rilevamento in grado di rilevare i fulmini su ampi territori, di calcolarne il punto di impatto al suolo con buona precisione e di fornire le caratteristiche elettriche di ogni scarica rilevata; questi sistemi vengono oggi per brevità definiti LLS - Lightning Location Systems

o sistemi di localizzazione dei fulmini [14-15], e sono in uso in molti paesi, rappresentando una delle più moderne tecnologie a disposizione per lo studio dei fulmini.

Negli anni '90 infine, vengono lanciati i primi satelliti con a bordo strumenti in grado di rilevare i fulmini sulla sfera terrestre [16].

DA DOVE VENGONO LE CARICHE ELETTRICHE

Se grazie al famoso aquilone di Franklin abbiamo capito che il fulmine è una scarica elettrica, meno facile è capire da dove arrivino le cariche elettriche necessarie alla sua formazione. Nonostante i molti sforzi in questo senso, non si è ancora giunti ad una verità incontestabile; esistono alcune teorie, suffragate da esperimenti e test di laboratorio, e la più accettata di queste verrà accennata qui di seguito.

Prima di affrontare la produzione di cariche strettamente necessaria al fulmine, iniziamo ricordando che delle cariche sono già presenti in atmosfera e contribuiscono alla conduttività di questa.

Lo strato di atmosfera vicino alla crosta terrestre, infatti contiene ioni ed elettroni generati da diversi fenomeni, primi fra tutti la radioattività terrestre ed i raggi cosmici. La percentuale di ioni ed elettroni varia passando dagli strati d'atmosfera vicini al suolo, ove si sente l'effetto della radioattività terrestre, verso quelli alti, ove predomina sempre più l'effetto dei raggi cosmici.

La presenza in aria di queste cariche fa sì che esista un campo elettrico non nullo in atmosfera e tra questa ed il suolo. L'atmosfera al di sopra dei 60 km contiene un quantitativo di cariche molto superiore agli strati più bassi e

può essere, dal punto di vista elettrico, vista come uno strato conduttore equipotenziale, denominato Elettrosfera. In condizioni di tempo sereno si possono allora schematizzare l'elettrosfera ed il suolo come le due parti di un condensatore sferico immaginario, carichi a $+5 \cdot 10^5$ C e $-5 \cdot 10^5$ C rispettivamente; la differenza di potenziale tra le due parti è di 300 kV. Essendo l'aria tra i due gusci del condensatore un debole conduttore, in presenza di una differenza di potenziale tra i gusci stessi si genera una corrente, che tende a ristabilire l'equilibrio elettrico. Questa corrente è effettivamente presente tra l'elettrosfera ed il suolo, con intensità di 1 kA totale, ovvero di 2 pA/m^2 . Essa scaricherebbe il "condensatore" nel giro di 10 minuti, se non fossero presenti altre forme di ricarica, oltre alla produzione naturale di ioni/elettroni descritta sopra [1]. Altri meccanismi di separazione di cariche devono quindi esistere e vengono identificati nei cosiddetti meccanismi di produzione locale di cariche in atmosfera:

- Temporali/cumulonembi
- Sprite/Jets e fenomeni elettrici collegati ai temporali
- Nuvole di polvere vulcanica
- Tempeste di sabbia
- Tempeste di neve
- Incendi boschivi

• Forti venti (tornado e trombe d'aria).

Soprattutto il primo tipo di meccanismo, presente con circa 100 temporali al secondo sull'intero globo, consente di riportare in alta atmosfera cariche positive, per dispersione dalla sommità dei cumulonembi, e di riportare al suolo cariche negative, tramite i fulmini e l'effetto corona (vd. figura 1).

FORMAZIONE DI CARICHE NEL CUMULONEMBO

La formazione delle nubi dette cumuli avviene: quando particelle d'aria umida e calda salgono verso l'alto e si raffreddano per espansione adiabatica; quando nella particella l'umidità relativa supera il livello di condensa, si formano gocce d'acqua sul particolato atmosferico e si ha la nascita della nuvola. Se l'abbassamento di temperatura verso l'alto è più veloce del processo di condensa adiabatico, le particelle d'umidità salgono oltre lo zero termico, dove le più grosse formano ghiaccio ma le più piccole restano liquide (definite acqua superfredda); si ha quindi una regione a temperatura minore di zero, ove particelle di acqua e di ghiaccio coesistono. In questo caso si ha una nuvola del tipo Cumulonembo. In essa troviamo

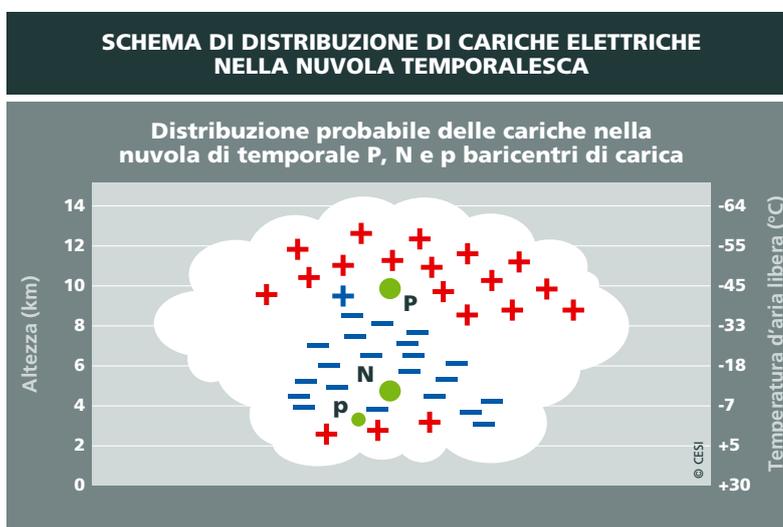


Fig. 2

NOMENCLATURA DEI FULMINI

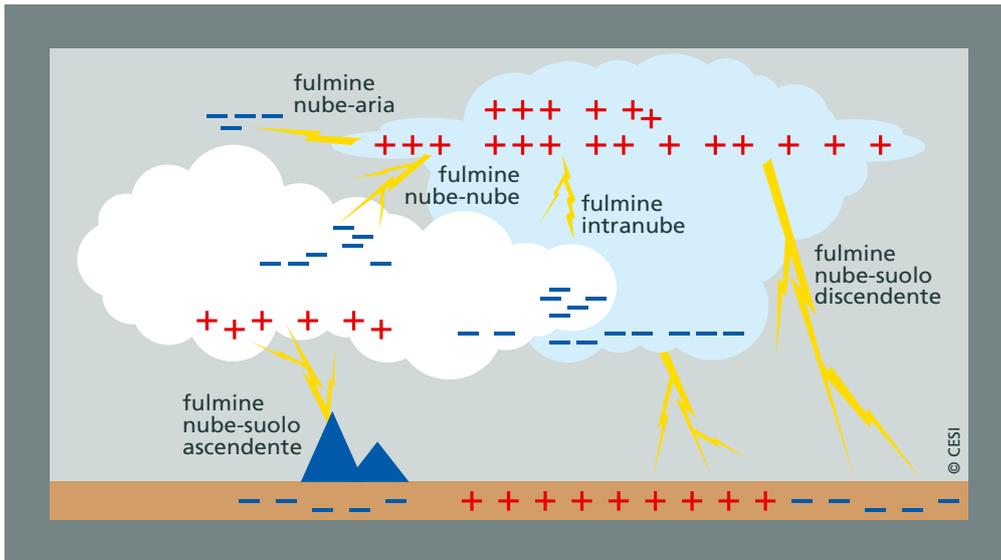
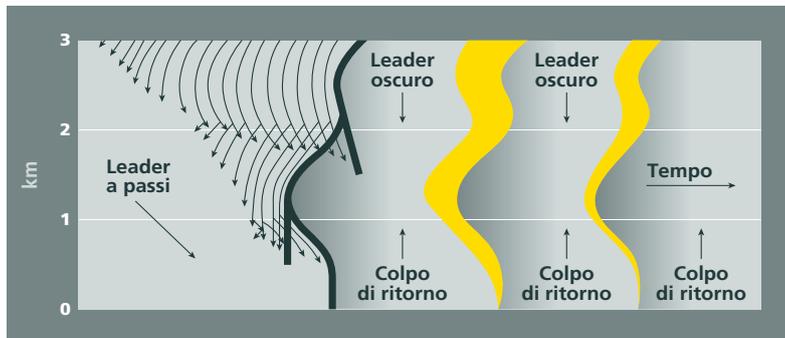


Fig. 3

SCHEMA DEL PROCESSO DI FORMAZIONE DEL FULMINE [17]

Fig. 4



perciò la coesistenza di ghiaccio ed acqua, in forma di particelle dette idrometeorie (particelle di acqua o ghiaccio aggregate); le più pesanti tendono a ricadere per gravità. Nel cumulonembo abbiamo inoltre la presenza di forti moti convettivi verticali; le particelle d'acqua e di ghiaccio coinvolte nei moti convettivi si

scontrano e questo porta alla liberazione di cariche per attrito. Si ottengono perciò particelle cariche elettricamente, libere all'interno della nuvola.

Le cariche elettriche formate all'interno del cumulonembo, tendono a disporsi in poli di cariche opposte, all'interno del volume della nuvola. Vari poli

possono coesistere all'interno di una nuvola, tuttavia nella maggioranza dei casi si può rappresentare un Cumulonembo con le cariche positive verso l'alto della nuvola, e le negative verso il basso, in forma di dipolo.

A volte un terzo polo positivo, di consistenza minore, è posizionato verso il basso della nuvola.

Il terreno sottostante tipicamente si polarizza con carica opposta a quella del fondo della nuvola.

Il campo elettrico generato da una nuvola temporalesca al suolo sotto di essa, è dell'ordine di $1-10 \cdot 10^3 \text{ V/m}$ e si può facilmente simulare tramite lo schema elettrico di tripolo della nuvola (vd. figura 2).

IL FULMINE

Se s'ipotizza che un fulmine non sia altro che una scarica dovuta alla rottura del dielettrico presente nel condensatore, formato dal suolo e dal fondo della nuvola, si può calcolare la variazione di campo elettrico al suolo dovuta a questa scarica, ipotizzando che essa neutralizzi in parte le cariche del di/tripolo di carica presente nella nuvola. Misure di campo al suolo confermano che i fulmini rappresentano delle rapide variazioni di campo paragonabili a quelle così ipotizzate. Il gradiente di campo elettrico necessario alla rottura dielettrica dell'aria, in presenza di idrometeorie e pioggia, risulta essere, di valori misurati realmente in presenza di cumulonembi, di circa $2 \cdot 10^5 \text{ V/m}$.

Possiamo infine definire un fulmine come: una scarica elettrica di alta intensità di corrente, breve durata, spazialmente estesa, che avviene quando nelle nubi si formano regioni cariche elettricamente di segno opposto, tali che il gradiente di campo elettrico sia sufficiente a provocare la rottura del dielettrico (aria).

NOMENCLATURA

Data la definizione di fulmine, s'intuisce subito che, a seconda della disposizione delle cariche nella nube ed al suolo, si potranno avere situazioni elettriche e spaziali differenti, che origineranno scariche, almeno geometricamente, diverse. Infatti, un vasto campionario di scariche esiste in natura e queste vengono schematicamente divise in fulmini nube-nube e fulmini nube-suolo, con significato immediato. A loro volta i fulmini nube-nube si suddividono in:

- Intranube,
- Nube-nube,
- Nube-aria,

ove il nome della seconda categoria ripete quello generale.

I nube-suolo sono suddivisi in:

- ascendenti,
- discendenti,

a seconda che il canale ionizzato di inizio del processo sia partito dalla nuvola procedendo verso terra o viceversa. Gli ascendenti, necessitando di un canale ionizzato che parta da terra e proceda verso l'alto, si realizzano solo in presenza di punte elevate, torri, cime di monti, cioè situazioni particolari che permettano una ionizzazione intensa del "suolo". I vari tipi di fulmine sono mostrati schematicamente in figura 3.

Tutti questi fulmini vengono poi distinti elettricamente, in:

- positivi,
- negativi.

La distinzione dipende dal tipo di carica presente nella zona di partenza del canale ionizzato del fulmine. Nel caso di un fulmine nube-suolo discendente, per esempio, supponendo che parta dal basso della nube, se in questa zona della nube vi sono cariche negative il fulmine sarà negativo, cioè la corrente sarà diretta dal basso verso l'alto; viceversa, se sul fondo della nube vi sono cariche positive il fulmine sarà



positivo, cioè la corrente sarà diretta dall'alto verso il basso.

Questo è un modo semplice per ricordare la classificazione, che in realtà nasconde una situazione complessa, dovuta al verso della corrente che si genera nella scarica ed alle relative velocità di spostamento e ricombinazione di elettroni e ioni positivi.

La percentuale di fulmini nelle varie categorie varia in base alla latitudine, alla stagione, al tipo di temporale e ad altri fattori vari.

La percentuale di fulmini ascendenti dipende dalla presenza o meno di strutture alte e dall'altezza di queste, quindi è molto variabile e di non facile generalizzazione. Solitamente si considera che gli ascendenti siano una piccola percentuale.

CIÒ CHE VEDO NON È CIÒ CHE ACCADE

Non vogliamo qui addentrarci nella descrizione del fenomeno fisico che in dettaglio origina il fulmine. Vogliamo però ricordare alcuni punti salienti di questo percorso, la cui comprensione può essere utile [17].

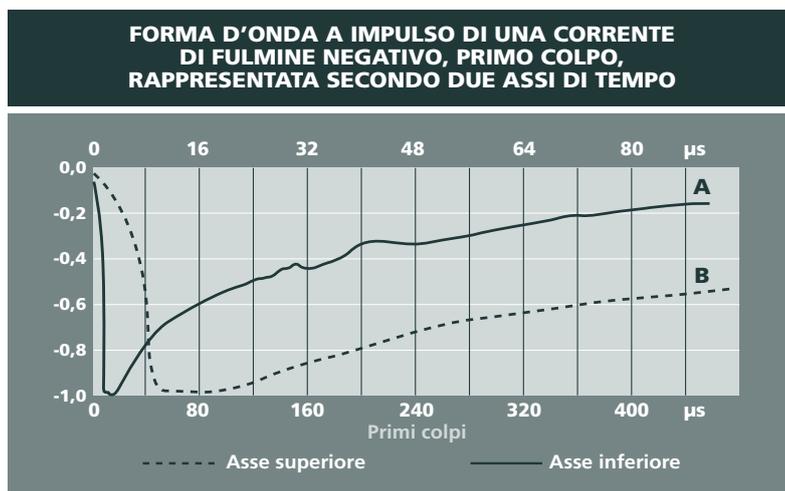
Il fulmine, così come appare ai nostri occhi, è una scia luminosa che percorre un tragitto più o meno tortuoso e che si esaurisce nell'arco di 0.2-0.5 s. In realtà in questo tempo relativamente

lungo avvengono una serie di fenomeni distinti e conseguenti, che il nostro occhio non riesce a distinguere e che nel complesso vengono chiamati fulmine (vd. figura 4).

Il fulmine inizia con la formazione di una zona locale ionizzata, per esempio vicino al fondo della nube (nel caso di fulmine discendente), in forma allungata detta di "streamer". Questa ionizzazione iniziale si estende a formare un canale ionizzato di qualche decina di metri, canale che viene poi prolungato in avanti da canali simili, con progressione a passi successivi, da cui questo processo prende il nome di "leader a passi"; tutto questo viene formandosi senza la presenza di intensa luminosità. Quando il canale ionizzato del leader a passi raggiunge il suolo, le cariche di polarità opportuna, presenti nel terreno, tendono ad essere richiamate verso la nube lungo il canale; di fatto questo stadio rappresenta la chiusura del circuito elettrico ed il conseguente passaggio di corrente.

In modo più appropriato si descrive questo stadio come l'innescò di un'onda di ricombinazione ionica che percorre a ritroso tutto il canale, producendo luce ed alte temperature (circa 30.000 K in un canale di pochi cm di dia-

Fig. 5



DISTRIBUZIONE DI PROBABILITA' DI CORRENTE DEL FULMINE PER FULMINI NEGATIVI E POSITIVI REGISTRATI DAL SISTEMA SIRF SULL'ITALIA ANNI 1996 - 2005

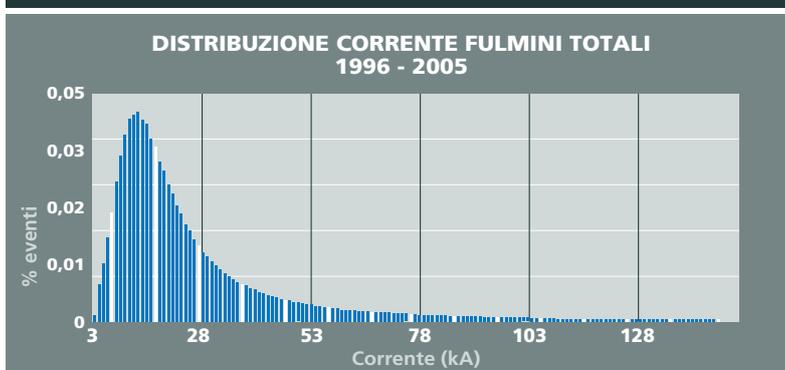


Fig. 6

DISTRIBUZIONE PERCENTUALE DEL NUMERO DI FULMINI TOTALI PER MESE, SECONDO I DATI REGISTRATI DAL SISTEMA SIRF SULL'ITALIA ANNI 1996 - 2005



Fig. 7

metro). Questo fenomeno è detto "colpo di ritorno" ed è la causa della scia luminosa vista dal nostro occhio, nonché dell'onda sonora di tuono. A questo punto il fulmine è completo, ed a volte qui si esaurisce; sono passati circa 100 ms dall'innesco dello streamer.

Altre volte invece lungo il percorso precedente del colpo di ritorno rimane un canale parzialmente ionizzato, lì dove prima si era creato il leader a passi; questa traccia viene sfruttata per un successivo processo di ionizzazione verso terra, detto "leader oscuro" che richiuderà

il circuito e creerà un secondo colpo di ritorno, con passaggio di corrente e luminosità conseguente. Questo processo di leader oscuro e colpo di ritorno successivo al primo dura circa 50-100 ms, può avvenire più volte e viene considerato sempre parte del fenomeno fulmine. Ciascun colpo di ritorno successivo al primo viene detto colpo secondario o colpo successivo di fulmine. Il 55% circa dei fulmini è formato da più colpi successivi di corrente, fino anche a 10-20 colpi e con media di 2-3 colpi per fulmine. Il percorso dei colpi successivi è solitamente lo stesso del primo e si manifesta come re-illuminazioni successive dello stesso percorso, illuminazioni che tuttavia l'occhio umano non riesce a percepire come distinte; in alcuni casi tuttavia il canale viene percorso solo in parte ed il punto di impatto al suolo del colpo successivo è diverso da quello del primo colpo.

Un'ultima complicazione nel meccanismo del fulmine è introdotta durante lo sviluppo del leader a passi. Mentre questo procede, diciamo dalla nuvola verso terra, spesso dalle punte al suolo si generano ionizzazioni sufficienti ad innescare dei leader ascendenti, che procedono sostenuti dal campo generato all'avvicinarsi del leader discendente. In questo caso perciò il leader discendente non incontra direttamente il suolo, ma incontra prima uno di questi leader ascendenti, chiudendo il circuito e provocando il successivo passaggio di cariche e di corrente.

CARATTERISTICHE DEI FULMINI

Le caratteristiche principali del fulmine sono derivate dagli esperimenti con torri elevate, lancio di razzi, spettroscopia, LLS, come ricordato sopra.

Riassumiamo alcune di esse, senza pretese di completezza. Molte informazioni citate qui sono desunte dai dati registrati dal LLS Italiano, di proprietà del CESI e denominato SIRF-Sistema Italiano rilevamento Fulmini, rete che è in funzione dal 1994 con continuità su tutto il territorio italiano [18]. In particolare per i valori qui riportati si sono utilizzati i dati di fulmine registrati nell'area 36 – 48 N, 6 – 20 E, che copre interamente il territorio italiano.

Corrente di fulmine

Concentrandosi su i fulmini nube-suolo, ben noti e di maggior impatto sulle attività umane, si possono esaminare alcune caratteristiche delle correnti ad essi associate.

In particolare, per i fulmini discendenti negativi, formati da uno o più colpi successivi, si trovano forme d'onda tipicamente impulsive, sia per le correnti di primo colpo che per quelle dei colpi successivi (vd. figura 5). I tempi di salita sono di 1-30 μ s e 0.2-5 μ s rispettivamente per primi colpi e successivi, mentre i tempi all'emivalore sono rispettivamente di 10-250 μ s e 5-150 μ s [17].

I fulmini discendenti positivi sono sempre composti da un solo colpo. I valori di picco della corrente di fulmine variano da valori minimi di 2-3 kA a valori massimi di 100 kA o anche 200-300 kA nel caso di scariche positive; la distribuzione di probabilità delle correnti assume una concentrazione prevalente intorno ai valori tra 5 e 40 kA, come mostrato in figura 6.

Il calcolo del valor mediano (valore al 50% di probabilità) della corrente di fulmine, sia per scariche positive sia negative, sta subendo in questi ultimi anni una revisione profonda, dopo l'introduzione di LLS in molti

paesi. Il valore classico è, infatti, calcolato in letteratura tramite misure con strumenti associati a torri elevate; questa situazione sperimentale tuttavia, introduce una distorsione verso l'alto nella misura, a causa della presenza delle torri stesse, ed il campione di dati è sempre molto esiguo. Viceversa con l'utilizzo delle reti LLS è possibile registrare un gran numero di eventi, in ogni configurazione di territorio; i valori mediani ricavati da questo tipo di misure [19] risultano costantemente più bassi di quelli classici, come ci si aspetta.

Rilevando i dati di fulmine caduti sull'Italia dal 1996 al 2005 con il sistema SIRF i valori mediani di corrente risultano:

- fulmini negativi: -18 kA
- fulmini positivi: +35 kA

Numerosità

Il numero totale di fulmini nube-suolo registrati da SIRF sull'Italia dal 1995 al 2004 è di 16.097.103, corrispondente ad un numero di fulmini negativi di 14.522.271 (90 % del totale) e ad un numero di fulmini positivi di 1.574.832 (10 % del totale), confermando con questa divisione quanto generalmente riportato in letteratura per le zone temperate. Il numero medio di fulmini all'anno, sull'Italia, risulta dunque:

$$\text{Numero Medio per anno} = 1.609.710 \text{ fulmini/anno}$$

I dati raccolti si possono rappresentare in funzione del mese,

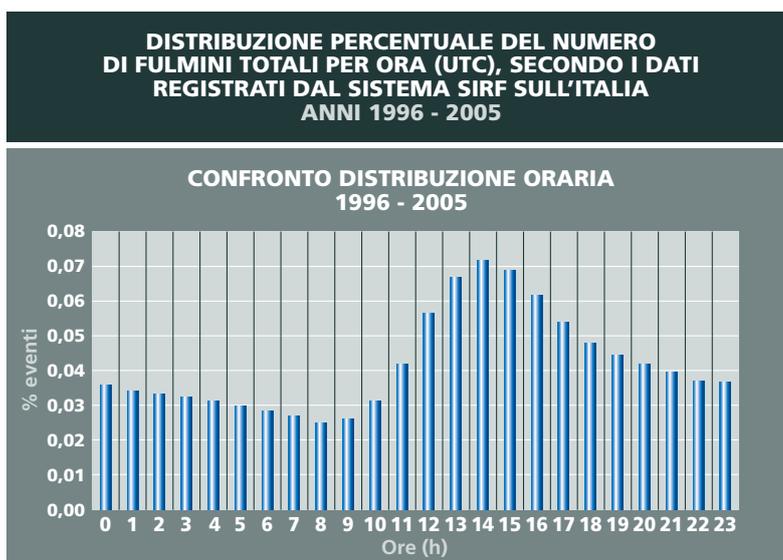
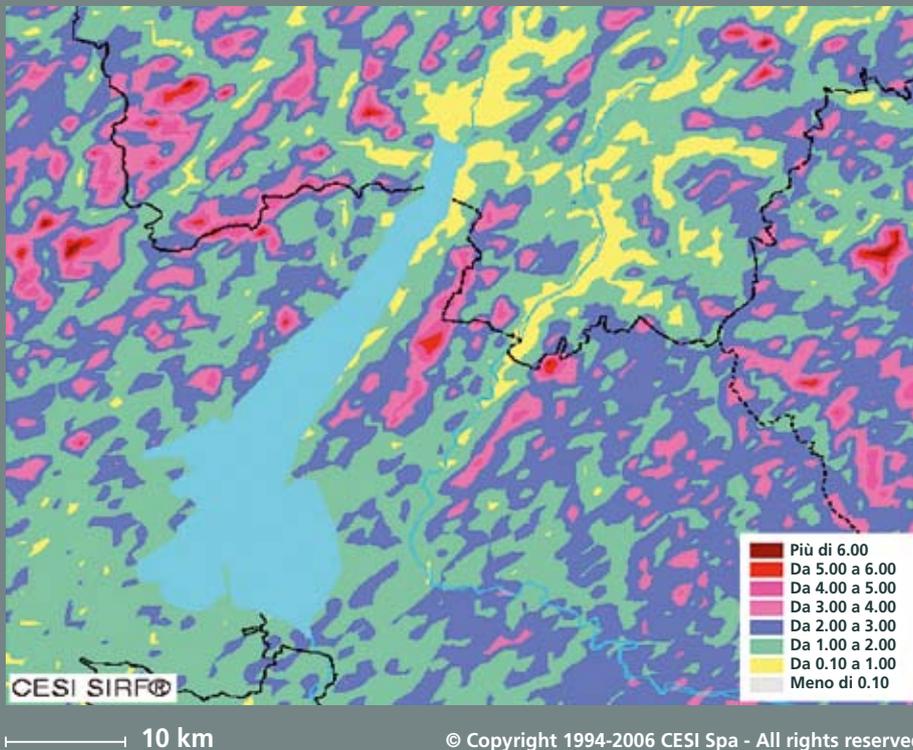


Fig. 8



**ZONA DEL LAGO DI GARDA:
DENSITA' DI FULMINAZIONE
CALCOLATA SUL PERIODO 1996 - 2006
Grigliato 1x1 km, fasce da 0 a più di 6 fulmini/km² anno**



© Copyright 1994-2006 CESI Spa - All rights reserved

Fig. 9
Fig. 10

**ZONA DEL LAGO DI GARDA:
OROGRAFIA E GEOGRAFIA
Da Google Earth**



come in figura 7, evidenziando che il periodo di maggior ceraunicità per l'Italia coincide con i mesi di Luglio e Agosto. Suddividendo la distribuzione in fulmini positivi e negativi si evidenzia inoltre che la percentuale relativa di fulmini positivi nei mesi autunnali/invernali è maggiore rispetto a quella dei fulmini negativi nello stesso arco di tempo. Di fatto, è anche noto che i fulmini positivi che cadono in autunno ed inverno sono mediamente più intensi, nonché accompagnati da precipitazioni abbondanti e da fenomeni violenti. Conteggiando il numero totale di fulmini caduti in ciascuna fascia oraria (vd. figura 8) si evidenzia come le ore di maggior concentrazione di fulmini siano quelle del pomeriggio, mantenendosi comunque elevate durante la sera, così come istintivamente ben noto ed importante da ricordare soprattutto in montagna, ove la formazione di temporali pomeridiani è frequente ed a volte improvvisa.

Densità al suolo

La densità di fulminazione al suolo, vale a dire il numero di fulmini all'anno caduti al km², è un dato indispensabile per la valutazione della pericolosità di una zona di territorio rispetto al fenomeno in questione. Tramite le registrazioni dei fulmini effettuate dalle reti LLS ed in Italia dalla rete SIRF, è possibile ricostruire con buona precisione quest'informazione [20]. In particolare, valutando Ng sul territorio italiano per il periodo 1996-2006 di dati, si ottengono delle mappe cerauniche che indicano con chiarezza le zone più esposte al fulmine per la penisola. Esse coincidono con l'arco prealpino, con particolari intensità nelle zone dei Laghi e del Friuli, con l'Appennino Ligure e con alcune zone dell'Appen-

nino centrale, tra cui spicca la zona di Roma. Tramite una mappatura a griglia fine, utilizzando il massimo dettaglio spaziale disponibile (si ricorda che la rete SIRF ha una precisione media, sul punto di impatto del singolo fulmine, di 500 m), si verifica facilmente che le zone più colpite in ogni regione coincidono con le alture montane, mentre le vallate attigue vengono risparmiate dalle fulminazioni. Questo dato conferma quanto già noto empiricamente e consiglia pertanto di evitare le alture principali e le creste in presenza di temporali. Ad esempio si veda in figura 9 la mappa ceraunica della zona del Garda, con i rilievi ben evidenziati dalle maggiori densità di fulminazione; per confronto immediato si veda la figura 10 dei rilievi locali.

ALLERTA FULMINI

Sapere cosa sono i fulmini e sapere come comportarsi in loro presenza è fondamentale ma, altrettanto, può essere di aiuto sapere se nel giro di poche ore un temporale arriverà sulla nostra testa.

Grazie alla moderna tecnica delle reti di rilevamento, è oggi possibile registrare ogni scarica che avvenga sul territorio italiano, ma soprattutto è possibile avere l'informazione sulla posizione di una scarica pochi secondi dopo lo scoccare della stessa. Quest'estrema velocità di ricostruzione del dato, unita ad un'ottima precisione spaziale, consente di controllare in continuo ed in tempo reale le perturbazioni temporalesche e le scariche connesse che avvengono sull'Italia, verificando dove

insistono e dove stanno andando.

In particolare, la possibilità di controllare lo spostamento dei fronti temporaleschi permette di valutare con anticipo se una zona particolare verrà interessata dal fenomeno ed, eventualmente, reagire di conseguenza.

Strumenti ad hoc sono stati sviluppati per consentire a diverse tipologie di utenti di avvalersi di questa possibilità di monitoraggio ed allerta, siano essi enti preposti al controllo del territorio, siano industrie a rischio di fulminazione o siano infine privati che vogliano essere avvertiti del pericolo imminente di temporali. Nell'ambito della prevenzione da rischi ambientali ed in particolare per attività legate alla montagna, questi strumenti possono rivelarsi estremamente proficui.

Bibliografia

[1] Rakov V., Uman M. A.: "Lightning Physics and Effects", Cambridge Univ. Press, Cambridge UK, 2000

[2] Cohen I. B.: "Benjamin Franklin's Science", Harvard Univ. Press, Cambridge Mass., 1990

[3] Meyer G.: "Ein versuch, das spectrum des blitzes zu photographieren, Ann. Physik Chem., 51, 415-416, 1894

[4] Orville R.E. et al.: "Temperature and electron density in long air sparks", J. App. Phys., 38, 895-896 1967

[5] Boys C. V.: "Progressive Lightning", Nature, 124, 54-55, 1929

[6] Malan D.J.: "The relation between the number of strokes, stroke intervals and the total durations of lightning discharges", Geofis. Pura Appl. 34, 224-230, 1956

[7] Shonland B.F. and Chollens H.: "Development of the lightning discharge", Nature, 132, 407-408, 1933

[8] Berger K. e Vogelsanger E.: "Photographische blitzuntersuchungen del Jahre 1955-1965 auf dem monte San Salvatore", Bull. SEV, 56, 2-22, 1966

[9] Garbagnati E. et al.: "Rilievi delle caratteristiche dei fulmini in Italia. Risultati ottenuti negli anni 1970-1973", Elettrotecnica, 57/62, 237-249, 1975

[10] Le Renardieres Group: "Research on long air gap discharges at Les Renardieres", Electra, 23, 53-157, 1972

[11] Carrara G.G.: "Investigation on impulse sparkover characteristics of long rod/rod and rod/plane gaps", CIGRE Report n 328, 1964

[12] Pierce E.T.: "The influence of individual variations in the field changes due to lightning discharges upon the design and performance of lightning flash counters", Arch. Meteor. Geophys. Bioklim., A9, 78-86, 1956

[13] Newman M.M.: "Use of triggered lightning to study the discharge channel", Problems of Atmospheric and Space Electricity, Elsevier, New York, 1965

[14] Krider E.P. et al.: "A gated wideband magnetic direction finder for lightning return strokes", J. Appl. Meteor., 15, 301-306, 1976

[15] Orville R.E.: "Annual summary - Lightning ground flash density in the contiguous United States-1989", Mon. Wea. Rev., 119, 573-577, 1991

[16] Christian H.J., Latham J.: "Satellite measurements of global lightning", Q.J.R. Meteor. Soc., 124, 1771-3, 1998

[17] Uman M.A.: "Lightning", Dover Pub. Inc., New York, 1969

[18] M. Bernardi, D. Ferrari: "The italian lightning detection system (CESI-SIRF): main statistical results on the first five years of collected data and a first evaluation of the improved system behavior due to a major network upgrade", Proc. of the 25th International Conference on Lightning Protection, Rhodes, Sept. 2000

[19] Rovelli, M. Bernardi: "Extrapolation of the median value of the lightning current on the basis of existing measurements", J. Lightn. Res. (JOLR), 2006

[20] M. Bernardi, D. Ferrari: "Evaluation of the LLS efficiency effects on the lightning density at ground, using the italian lightning detection system SIRF", J. of Electrostatics, 60 (2004), pp. 131-140, 2004

