

Appunti dalle lezioni del corso di

MODELLISTICA ELETTROMAGNETICA DEI MATERIALI

(prof G. Lupò)

CAPITOLO V

CONDUZIONE E SCARICHE NELL'ATMOSFERA

(prima bozza)

§V.1 Il fulmine

Il fulmine è un complesso fenomeno naturale che ha trovato i suoi sistematici osservatori e studiosi nel XVIII secolo, unitamente ad esperienze di laboratorio per lo studio di fenomeni elettrostatici (abbiamo già visto ad esempio, le figure di polvere di Lichtenberg). L'origine, la consistenza, le modalità di distribuzione delle cariche ed il violento fenomeno di collasso e trasporto solo in parte visibile attraverso il "lampo" sono stati oggetto di ipotesi diverse fino ai nostri giorni. Probabilmente non è possibile concepire una teoria "unificante" per la formazione e lo sviluppo del fulmine, data la varietà dei parametri che possono entrare in gioco.

Del resto, come vedremo, si considerano correntemente "fulmini" fenomeni naturali di aspetto e consistenza diversa, per cui si passa dalle *aurore boreali*, che si classificano meglio come "plasmi quiescenti", ai *fulmini rotolanti* (in cui rientrano anche i *fuochi di Sant'Elmo*, che spaventavano i passeggeri dei primi dirigibili attraversando silenziosamente le pareti del velivolo e non provocando di fatto alcun danno, agli *streamer* e/o *scariche glow* che apparivano d'improvviso sugli alberi delle navi durante le tempeste e fecero sorgere il mito dell' *Olandese Volante* nel 1600), ai canali tortuosi e ramificati comunemente chiamati "*saette*", alle *colonne di fuoco* o *sprites* ("spiriti") diretti verso la stratosfera, sino alla più recente individuazione di *superfulmini* sia sulla Terra, non visibili dal basso, ma confermati dalle missioni degli Shuttle, che su Giove, Saturno e persino sul Sole ("*planetary lightning*").

Oltre alla curiosità ed alla naturale apprensione che un fenomeno così vistoso (accompagnato, se non molto distante, anche dall'onda d'urto sonora o tuono) ha provocato dall'antichità ai giorni nostri (qualcuno dei lettori forse ricorderà due memorabili nottate tra il 14 ed il 16 agosto 2006, in cui ci fu su tutta la Campania una attività *ceraunica*¹ particolarmente intensa e spettacolare), occorre prendere modelli fenomenologici che descrivano le situazioni più frequenti. Da essi infatti dovremo ottenere dei suggerimenti "ingegneristici" non solo per garantire con sufficiente margine la sicurezza delle persone, ma anche quella dei beni, degli impianti, delle apparecchiature. Si pensi ad esempio alle possibili tensioni indotte da un

¹ Da κεραυνός, che in greco antico vuol dire appunto "fulmine".

fulmine anche “lontano” sulle delicate apparecchiature elettroniche a bordo di un aereo o sul suo sistema di telecomunicazione. Bisognerebbe limitare il valore di questi “disturbi” e, se ciò non è o si prevede che non sia possibile, progettare sistemi di salvaguardia temporanea, quale l’esclusione programmata del servizio (“autoacceccamento guidato”).

Nella tabella IV.7-I è riportato una significativa cronistoria dell’evolversi dello studio dei fenomeni elettrici nell’ambiente , con particolare riferimento alle osservazioni e deduzioni sui fulmini.

Nella fig. IV.7.1 è riportata l’edizione del 1752 de l trattato di Benjamin Franklin sulle sue esperienze condotte sui fulmini nei pressi di Filadelfia (la traduzione in francese si rese necessaria per la permanenza in Francia come esule)

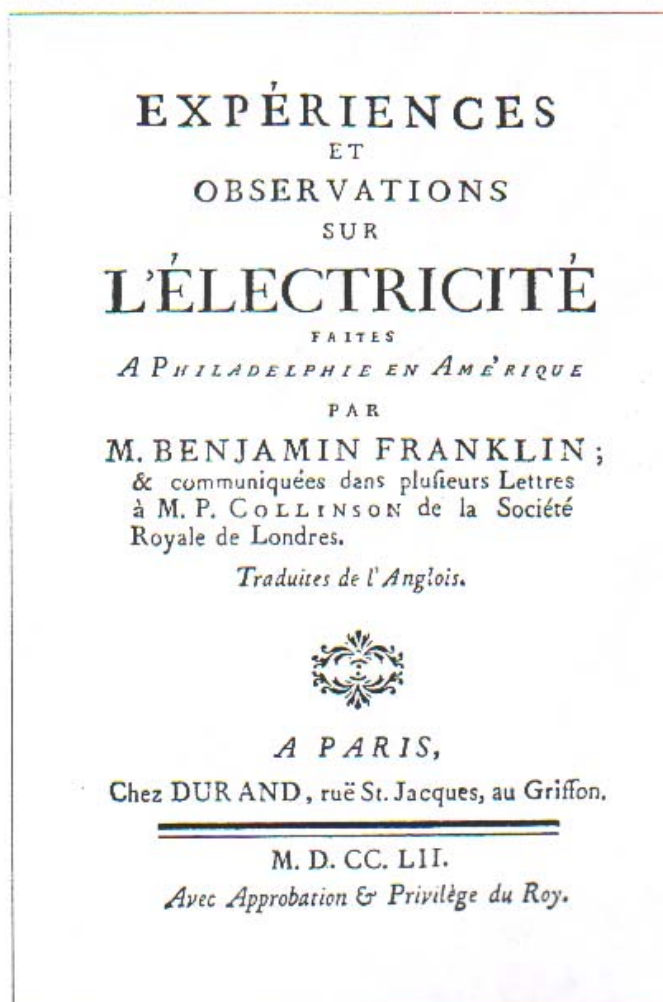


fig.IV.7.1

Tab V.7-I .CENNI STORICI sugli Studi sui Fulmini

1746	Winkler, J.H. Die Stärke der elektrischen Kraft des Wassers: Breitkopf, Leipzig	confronta le scariche elettriche con i fulmini e li collega all'interazione di particelle cariche nell'aria
1752	Franklin, B. Phys.Trans. Roy.Soc. <u>47</u> , 289	fa riferimento all'accumulo di cariche nelle nubi temporalesche, conduce esperimenti a Filadelfia
1752	D'Alibard, T.F. Letter to Acad. des Sciences	Conduce esperimenti simili a quelli di Franklin a Marly (Parigi) usando bottiglie di Leida
1753	De Romas, J. Memoire...Mem.Acad. Bordeaux	Provoca con un captatore una scarica elettrica di 3 m
1775	Beccaria, G.B. Dell'elettricità terrestre atmosferica a cielo sereno-Turin	studia le variazioni del campo elettrico in condizioni di bel tempo
1779	De Saussure, H.B. Voyage dans les Alpes - Geneva	introduce nuovi metodi di misura (elettrometro d'argento, conduttore mobile)
1782	Volta, A. -Del modo di rendere sensibilissima la più debole elettricità sia naturale sia artificiale. Phil.Trans.Roy. Soc. 72, p.237-280	prende in considerazione l'elettrificazione dell'aria a causa della vaporizzazione dell'acqua
1842	Peltier, A. Recherches sur la cause des phénomènes électriques de l'atmosphère. Ann.Chim.Phys. 4, 385	ipotizza una elettrificazione permanente negativa della terra
1860	Thomson, W. (Lord Kelvin) Atmospheric electricity Roy. Instn. Lect.	-costruisce elettrometri a grande sensibilità - propone la registrazione fotografica e l'uso di palloni-sonda - esegue misure sulla polarità della pioggia - introduce il concetto di gradiente del potenziale elettrico naturale

1887	Linss, F. Über einige Wolken- und Luftletrizität betreffende Probleme, Met. Z. 4,p.345-362	- valuta il tempo di rilassamento dell'aria in 10-50 minuti; eppure la terra rimane negativa
1896	Popov, A.S. J.Russ.Phys.Chem.Soc 28 p.7-9	- per primo rileva oscillazioni a radiofrequenza provenienti dall'atmosfera
1902	Heaviside, O. Thelegraphy. I. Theory Encicl. Brit,33, 213-218 Kennelly, A.E. On the evaluation of the electrically conducting strata of the earth's atmosphere. Electr.World, N.Y.,39,473	- quasi contemporaneamente postulano l'esistenza di strati conduttivi nella parte alta dell'atmosfera per giustificare la trasmissione a lunga distanza delle radioonde
1903	Walter, B. Ann.Phys.,Leipzig 10,393-407	studia la struttura del fulmine con una camera mobile
1905	Langevin, P. Sur les ions de l'atmosphère C.R. Acad.Sci.,Paris 140,232-234	dimostra la presenza nell'atmosfera di ioni di grandi dimensioni
1911	Hess, V.F. Messungen der durchdringenden Strahlen bei zwei Freiballonfahrten, S.B.Akad. Wiss.,Wien 120, 1575- 84	- attribuisce ai raggi cosmici la principale causa di formazione degli ioni nell'atmosfera; nella parte più alta interviene la radiazione solare, nella parte bassa contribuiscono i fenomeni radioattivi
1916	Wilson, C.T.R. On some determinations... Proc.Roy.Soc,A,92,555-74	- propone un modello di ionizzazione delle particelle d'acqua e di separazione di carica nelle nubi temporalesche
1920	Wilson, C.T.R. Investigation on lightning discharges... Phil.Trans.,A,221, 73-115	- suggerisce che la terra rimane negativa a causa delle precipitazioni negative in tutto il mondo
1926	Boys, C.V. Nature, Lond,118 749-750	- progetta una camera rotante (fig.1.1.8-9)
1927	Simpson, G.C. The mechanism of a thunderstorm Proc.Roy.Soc.A,14,376-401	- introduce l'idea della carica positiva localizzata nella parte inferiore della nube

1932	Schonland, B.F.J. Atmospheric electricity Metheun, London	- distingue tra lo strato conduttivo dovuto ai raggi cosmici (elettrosfera) dagli strati di Heaviside di origine solare (ionosfera)
1953	Newman, N.N. Aircraft and lightning - Thunderstorm electricity pp328-334	studia gli effetti dei fulmini sugli aerei con fusoliera metallica
1955		Gli USA pubblicano dati ed esperienze tenute segrete condotte su aeroplani durante la II guerra mondiale
1957 1958	Clark, J.F. Airborne measurement of atmospheric potential gradient J.Geophys.Res, 62,617-28 Kraakevik, J.H. Electrical conduction and convection currents in the proposphere. Rec.Adv.75-88	- misurano la conducibilità dell'aria sulla Groenlandia e stimano a 300 kV il potenziale dell'elettrosfera
1980		- programma NASA sui fulmini sia con rilievi, misure e sperimentazione sia a terra che in volo
1990		- primo utilizzo dello Shuttle per lo studio dei fulmini e dei fenomeni atmosferici ad alta quota

Quale primo approccio, lo studio del fulmine può prevedere studi e approfondimenti sui seguenti aspetti:

- 1. Fenomeni elettrici naturali nell'atmosfera**
- 2. Fenomeni di pre-scarica - Innesco del fulmine**
- 3. Sviluppo del canale di fulmine (leader).**
- 4. Controscariche - Ricongiungimento (attacco , salto finale)**
- 5. Colpo di ritorno (return stroke)**
- 6. Trasferimento delle cariche**
- 7. Saette veloci (dart leader) e successivi colpi di ritorno (restrike)**

Nella fig.IV.7.2 sono indicate alcune fasi significative nella formazione del fulmine, in due casi tipo (fulmine "discendente", fulmine "ascendente").

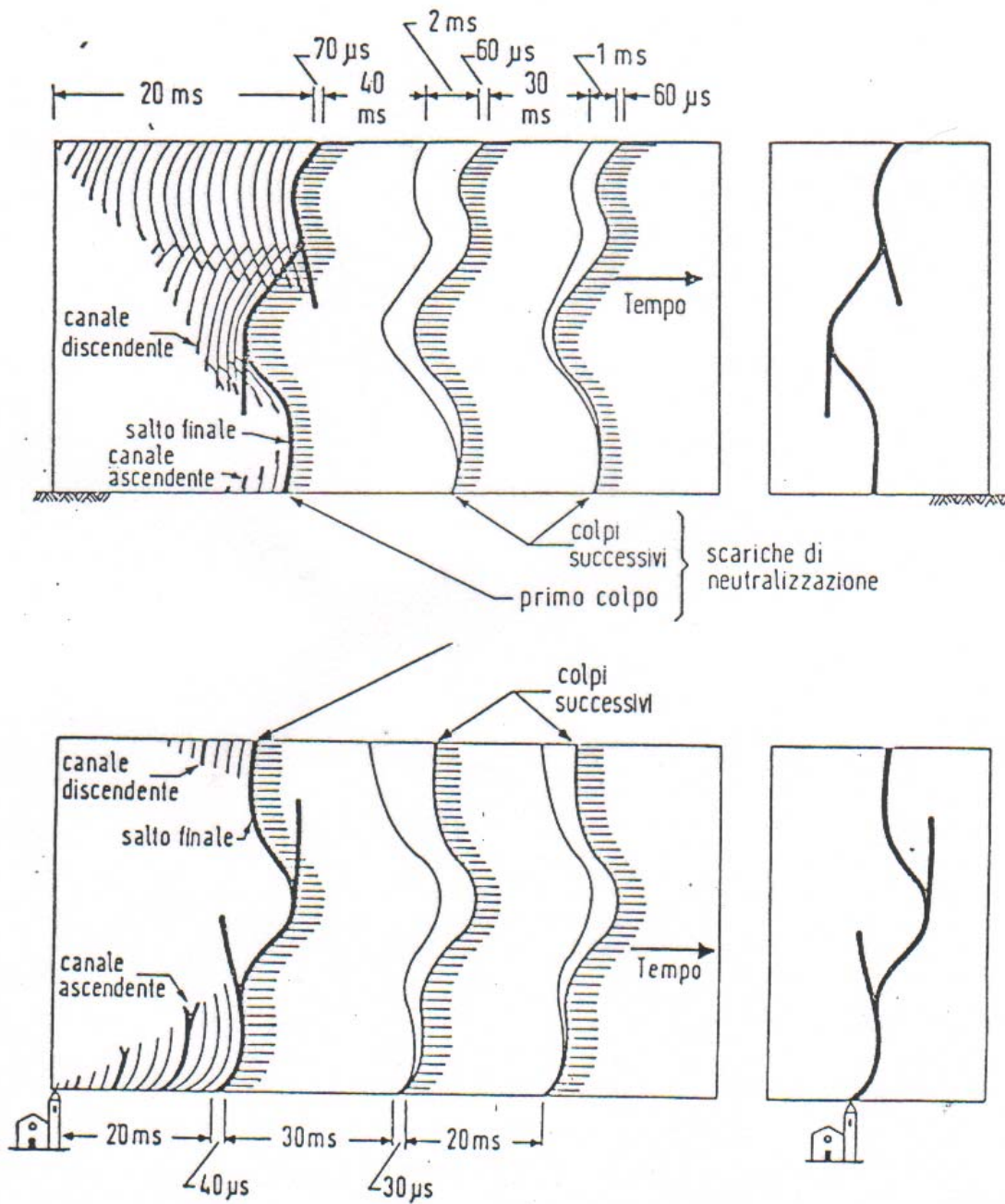


fig.IV.7.2

ELETTRICITÀ NELL'ARIA

- Formazione di cariche

- raggi cosmici
- radioattività
- moti convettivi
- eruzioni vulcaniche
- punte (corona, streamers,...)

- Trasferimento di cariche al suolo o su oggetti isolati

- correnti di conduzione e convezione
- correnti da punte in effluvio
- correnti da precipitazioni
- correnti di fulmine

COMPATIBILITA' CON FENOMENI ELETTROMAGNETICI "NATURALI"

Classificazione convenzionale dei disturbi :

- fino a 20-30 MHz (lightning)
- 0.2-100 GHz (segnali "cosmici")

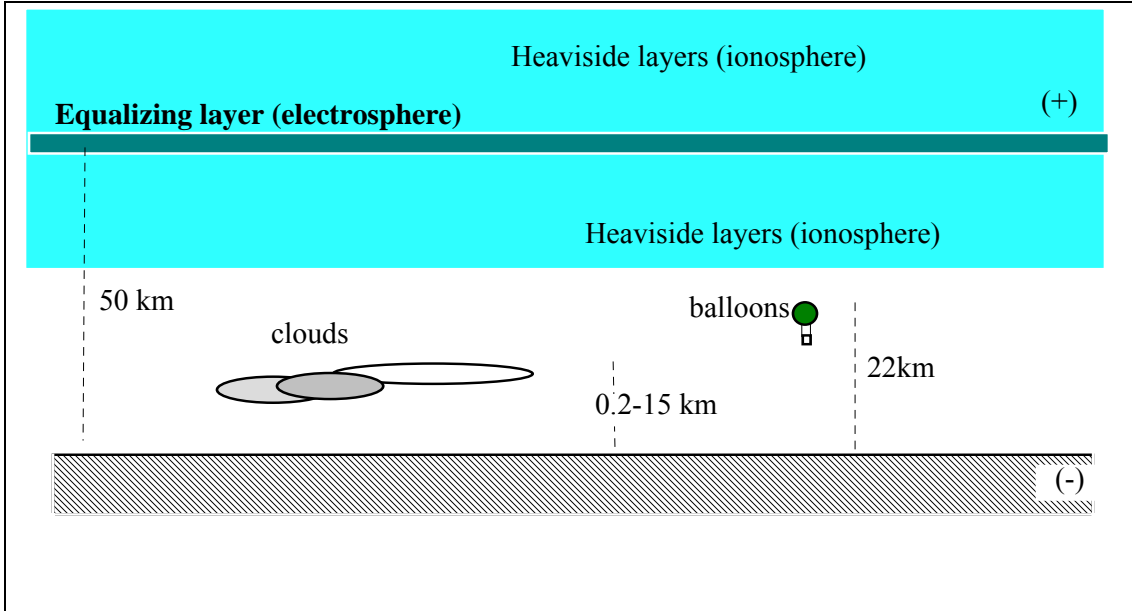
Classificazione dei disturbi associati ai fenomeni atmosferici (*atmospherics*)

- a) irregolari ad alta frequenza (stepped leader processes)
- b) regolari piccati (return stroke)
- c) regolari non piccati (return stroke)
- d) pacchetti di oscillazioni (return stroke)

Campi di frequenza

- very low-frequencies (tipicamente 30-120 Hz)
- very-ultra high frequency (400-800 Mhz)
- micro-onde (fino a 35 GHz), legate alle collisioni di microparticelle cariche

CORRENTI DI CONDUZIONE



VALORI MEDI DEI PARAMETRI DI CONDUZIONE

$$E_0 = E(h = 0) = 150 \left[\frac{V}{m} \right]$$

$$\sigma = \mu_+ n_+ q_+ + \mu_- n_- q_- = 2.3 \cdot 10^{-14} \left[\frac{S}{m} \right]$$

$$J_0 = \sigma E_0 = 3.45 \cdot 10^{-12} \left[\frac{A}{m^2} \right]$$

$$I_{earth} = J_0 S_{earth} = 3.45 \cdot 4 \cdot \pi \cdot (6.3)^2 = 1760 A$$

Carica "continuamente" trasferita

$$Q_c = I_{earth} T = 1760 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 \cong 55 \cdot 10^9 \text{ C / anno}$$

ossia

$$Q'_c \cong 110 \text{ C / km}^2 \text{ / anno}$$

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0}{\left(\frac{1}{r_{earth}} - \frac{1}{r_{electrosphere}}\right)} \cong \frac{4\pi\epsilon_0 r_{earth}^2}{h_{electrosphere}} \cong 40 \text{ mF}$$

$$G \cong 0.01 \text{ mS}$$

$$\tau \cong 1 \text{ h}$$

TAB. I - CONTRIBUTI ALLA CARICA AL SUOLO [C/KM²/ANNO]

Luogo	Autore	Conduzione a ciel sereno	Effluvi da punte	Precipitazioni	Fulmini	Totale
Cambridge	Wormell (1930)	+60	-100	+20	-20	-40
Kew	Chalmers (1949)	+35	-125	+22	-45	-113
Terra	Wait (1950)	+100	-30	+20	-20	+70
Terra	Israel (1953)	+90	-100	+30	-20	0

CORRENTI DI PRECIPITAZIONE

MECCANISMI DI SEPARAZIONE DI CARICHE NELLE NUBI

Nubi di maggior importanza:

- cumulo-nembi
- nembo-strati

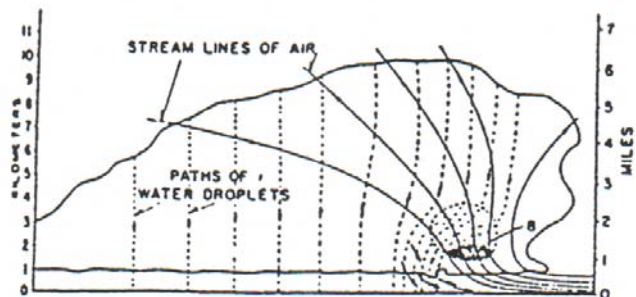
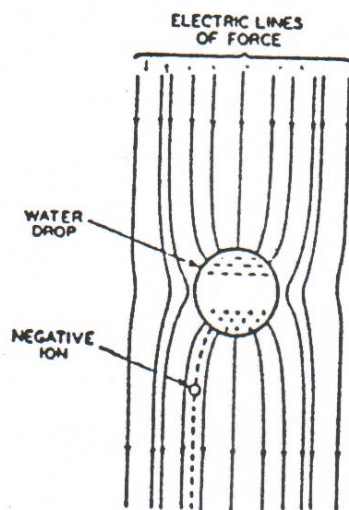
- **Teoria di Wilson** (1920): cattura preferenziale di elettroni e cariche negative da parte di gocce d'acqua in caduta polarizzate per induzione

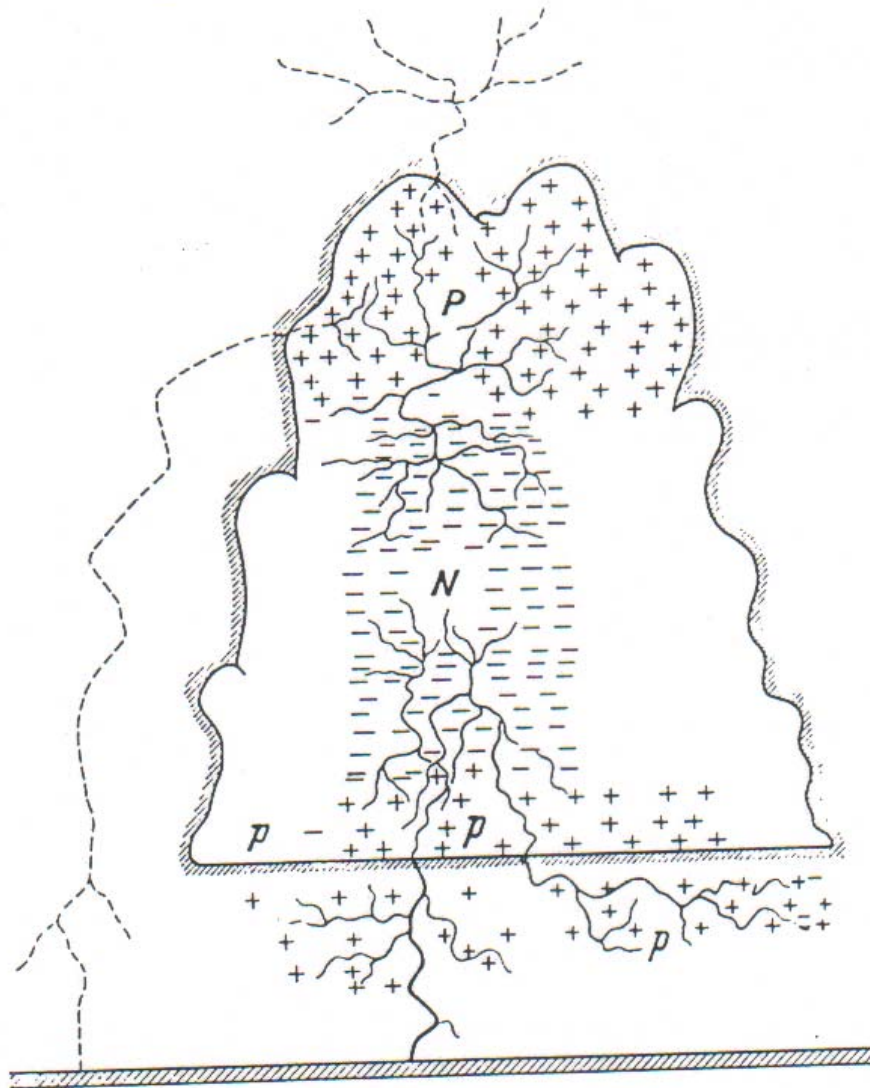
⇒ piogge "negative"

- **Teoria di Simpson** (1927): il meccanismo Wilson è integrato dalla formazione di ioni positivi a partire da gocce d'acqua polverizzate da correnti ascensionali

⇒ piogge "positive";

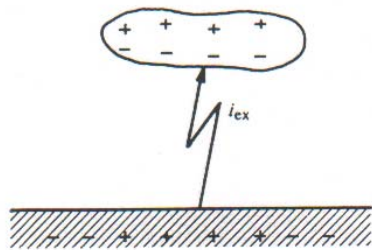
inoltre la distribuzione delle cariche nelle nubi è legata alla fase della particella e quindi alla temperatura.



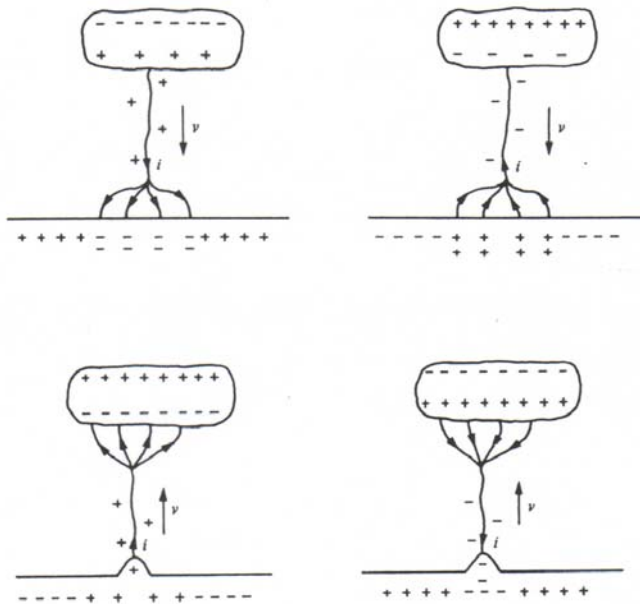


CLASSIFICAZIONE DEI FULMINI

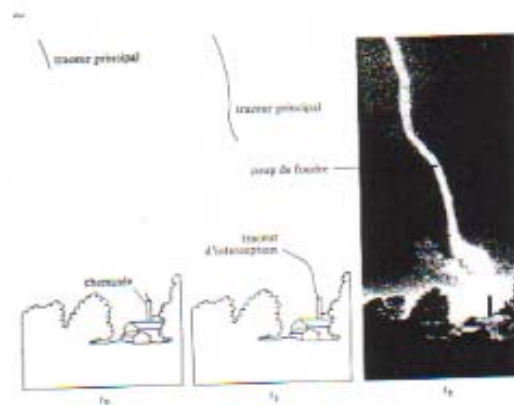
- nube-terra (cloud-to-ground lightning)
- interno alla nube (intracloud lightning)
- nube-nube (intercloud lightning)
- nube-aria (cloud-to-air lightning, sprites)



FULMINE NUBE-TERRA



- discendente negativo;
- discendente positivo;
- ascendente positivo²;
- ascendente negativo



²*Upward lightning* - Osservato per la prima volta all' Empire State Building (1939). Non è stato osservato il colpo di ritorno. Tale fenomeno è stato riscontrato per edifici alti oltre 100 m.



§IV.7 Il fulmine: Struttura e modello dell'elettrosfera – Aggregazione di cariche elettriche nelle nubi – Fenomeni di prebreakdown – Formazione e sviluppo del leader – Colpo di ritorno – Successive fasi del fulmine – Classificazione del fulmine – Modelli di fulmine – Valori tipici dei parametri del fulmine.

ALTRE CARATTERISTICHE DEL "MOVIMENTO" DEI FULMINI

Deviazioni (percorso a zigzag)

Ramificazione

Intercettazione











FREQUENZA DEI FULMINI

- Carte isocerauniche

- Medie mondiali: 30 fulmini al secondo



Giorni di maltempo/anno

Carta isoceraunica italiana



Fig. B 1 — Valori medi del numero N_f di fulmini a terra all'anno e al chilometro quadrato

REGISTRAZIONE DEL CAMPO AL SUOLO DURANTE UN TEMPORALE

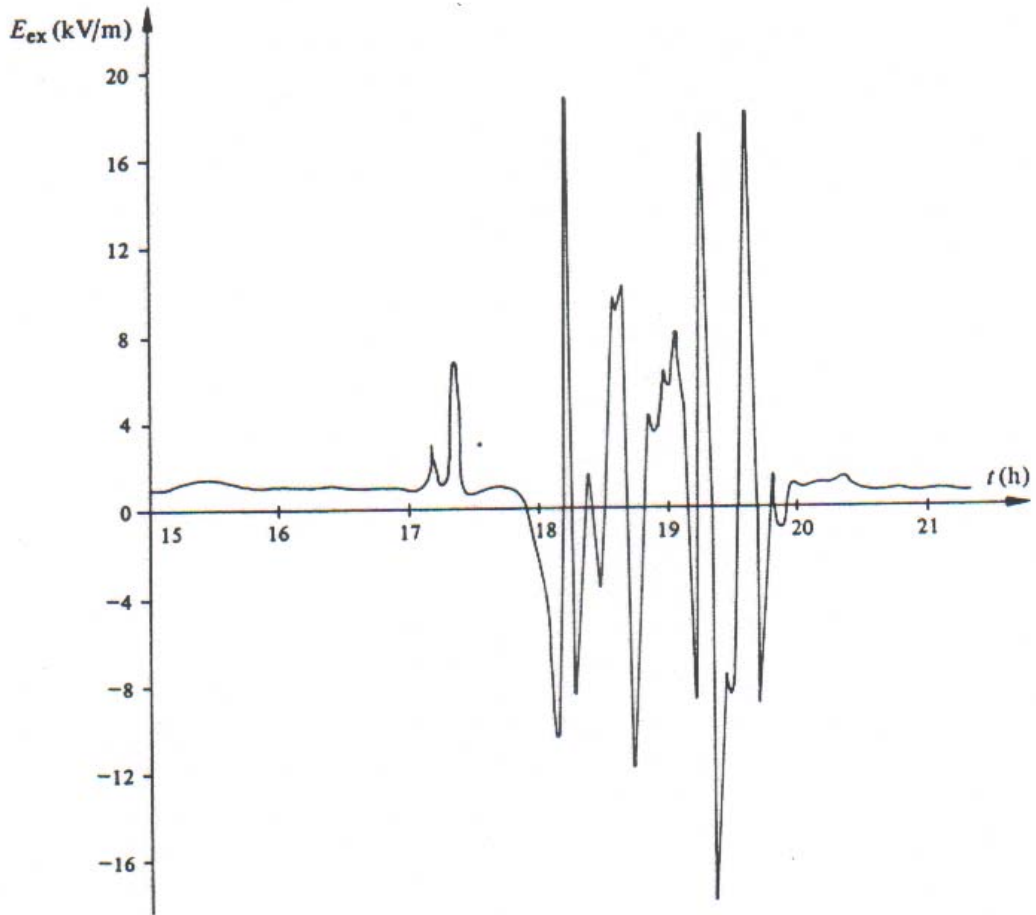


Fig. 3.14 Diagramme du champ électrique au sol mesuré durant l'orage du 10 juin 1979 à Lausanne.

REGISTRAZIONE DELLE FASI DI UN FULMINE LOCALIZZAZIONE DELLE SORGENTI

-
- Rilievo del "time to arrival" a ricevitori VHF sincronizzati

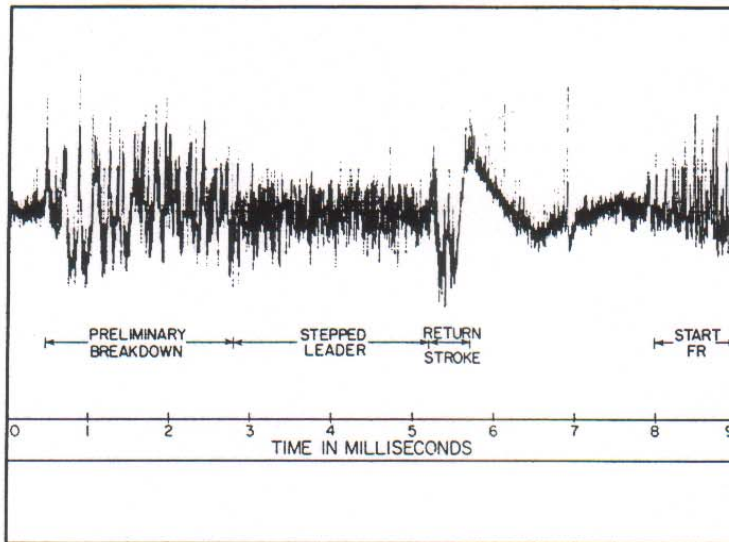


Fig. 8. Log-amplitude VHF radiation, 40 to 60 MHz, at the beginning of the 165959 flash on July 19, 1976 which struck the 150-m weather tower at the Kennedy Space Center. Adapted from Rustan (1979).

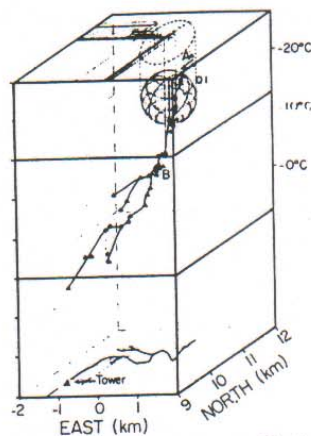
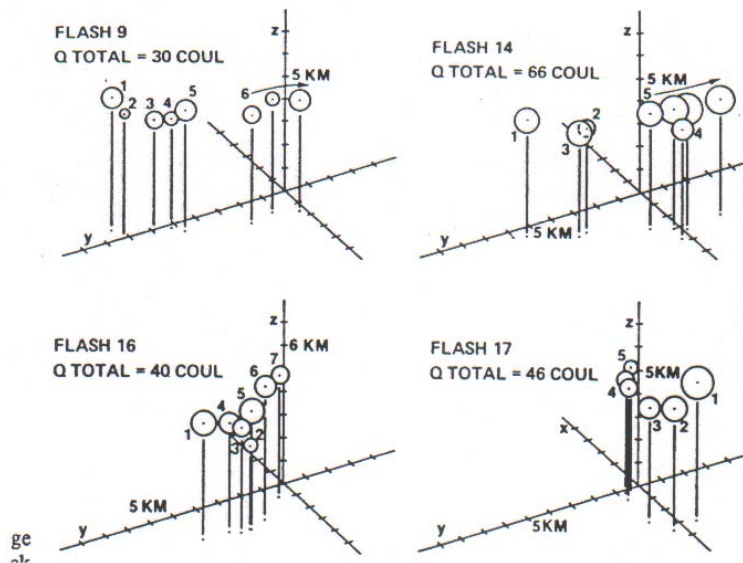


Fig. 9. VHF source locations for the preliminary breakdown (AB) and stepped leader (below B) for the lightning to ground whose VHF radiation is shown in Fig. 8. Locations are 94- μ s averages determined by finding time delays between VHF pulses arriving at four ground stations from cross-correlating the recorded signals for that time period. The first stroke charge Q_1 is reported in Uman *et al.* (1978) and determined using the technique of Krehbiel *et al.* (1979). Adapted from Rustan *et al.* (1980).

FASE DI PRE-BREAKDOWN (osservazioni sperimentali)

Ipotesi sui **centri di carica** - Localizzazione



Valori caratteristici:	distanza media tra i centri di carica	100 m
	raggio medio dei centri	10 m
	densità tipiche (medie)	20 C/km ³

REGISTRAZIONE DELLE COMPONENTI A BASSA ED ALTA FREQUENZA DURANTE UN TEMPORALE

Richiamo a meccanismi caratteristici

<p>J (junction-leader) M (Malan) K (Kitagawa)</p>	<p>processi tra centri di carica (bassa frequenza) id. a seguito del colpo di ritorno processi ad alta frequenza nella nube dovuti a colpi di ritorno "locali"</p>
<p>R S</p>	<p>processi associati al colpo di ritorno processi finali</p>

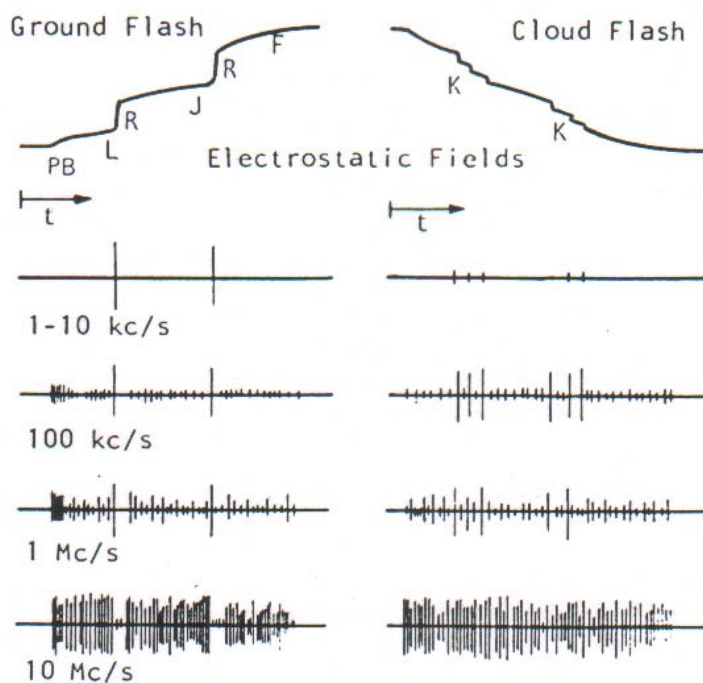


Fig. 5. Electric-field changes in the time domain and the corresponding fields at different frequencies for a typical cloud-to-ground flash and a typical intracloud flash, both at a distance of about 10 to 15 km and both having a duration of about 0.5 s. PB = preliminary breakdown; L = leader; R = return stroke; J = J-process; F = Final process which may be a continuing current or a cloud discharge; K = K-change. Amplitude scales for different frequencies are not the same. Adapted from Malan (1963).

MODELLI DI FULMINE

- 1) modello fisico-matematico che tenga in conto tutti i processi fisici elementari e le relazioni generali di conservazione e continuità
- 2) modelli topologici
- 3) modelli approssimati della corrente di fulmine che riproducano i campi misurati
- 4) modelli sperimentali in scala

-

MODELLO COMPLETO per la formazione del canale

Equazione del campo

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = - \frac{n_e + \sum_{k^-} k^- n_{kn} - \sum_{k^+} k^+ n_{kp}}{\epsilon_0} e$$

Equazioni di continuità

$$\text{elettroni } \frac{\partial n_e}{\partial t} - D_e \nabla^2 n_e + \nabla \cdot n_e \mathbf{v}_e = (\alpha - \eta) n_e |\mathbf{v}_e| + \frac{n_n}{\tau_n} + \frac{dn_\varphi}{dt} - a_e n_p n_e$$

$$\text{ioni negativi } \frac{\partial n_n}{\partial t} - D_n \nabla^2 n_n + \nabla \cdot n_n \mathbf{v}_n = \eta n_e |\mathbf{v}_e| - \frac{n_n}{\tau_n} - a_n n_p n_n$$

$$\text{ioni positivi } \frac{\partial n_p}{\partial t} - D_p \nabla^2 n_p + \nabla \cdot n_p \mathbf{v}_p = \alpha n_e |\mathbf{v}_e| - a_e n_p n_e - a_n n_p n_n$$

$$\text{mol eccit } \frac{\partial n_i^*}{\partial t} = \delta_{ei} n_e |\mathbf{v}_e| + \delta_{ni} n_n |\mathbf{v}_n| + \delta_{pi} n_p |\mathbf{v}_p| - \frac{n_i^*}{\tau_i^*} \quad (i = 1, \infty)$$

Funzionicaratteristiche

$$\text{Drift } \mathbf{v}_e(E) = - \frac{\mathbf{E}}{|\mathbf{E}|} \mathbf{v}_e(|\mathbf{E}|), \mathbf{v}_n(E) = - \frac{\mathbf{E}}{|\mathbf{E}|} \mathbf{v}_n(|\mathbf{E}|), \mathbf{v}_p(E) = \frac{\mathbf{E}}{|\mathbf{E}|} \mathbf{v}_p(|\mathbf{E}|)$$

$$\text{ionizzazione, attacco, distacco } \alpha = \alpha(|\mathbf{E}|), \eta = \eta(|\mathbf{E}|), \tau_n = \tau_n(|\mathbf{E}|)$$

$$\text{eccitazione } \delta_{ei} = \delta_{ei}(|\mathbf{E}|), \delta_{ni} = \delta_{ni}(|\mathbf{E}|), \delta_{pi} = \delta_{pi}(|\mathbf{E}|) \quad (i = 1, \infty)$$

$$\text{fotoionizzazione } \frac{dn_\varphi}{dt} = \sum_{i=1}^{\infty} \iiint_V \eta_i \mu_i \frac{n_i^*(P_0) e^{\mu_i(P-P_0)}}{4\pi\tau_i(P-P_0)^2} dV_0$$

MODELLO TOPOLOGICO

- **Introduzione di modelli stocastici con caratteristica frattale**
- **Creazione di "liste" di possibili streamer**
- **Definizione di leggi di probabilità per l'avanzamento della scarica**
- **Valutazione del meccanismo precursore - Transizione streamer-leader**
- **Individuazione di uno o più meccanismi dominanti su lunghe distanze**
- **Caratterizzazione topologica del meccanismo di intercettazione**

-

SVILUPPO DEL LEADER

Tipi:

- Stepped leader

- α -leader (65%) : step (medio) di 50 m in 1 s ad intervalli di 50 s ($v_{max}=50$ m/s $v_{med}=1000$ km/s) elocità max di avanzamento velocità media

- β -leader (35%):step medio più lungo, velocità media di avanzamento molto più sostenuta, ramificazione presso la nube

- Caratteristica della corrente associata ad ogni step: valore di picco 1 kA, durata 1s, tempo di salita 0.1 s.

- dart leader

- scarica senza gradini, successiva al primo colpo di ritorno, tempo caratteristico 2ms, carica trasferita 1C

- nella fase finale, può trasformarsi in un dart-stepped leader

Valori medi e globali dello stepped-leader:

- Velocità media di sviluppo: 200 km/s

- Carica trasferita nel leader: 5 C

- Potenziale del canale leader: $\approx \pm 100$ MV (campo di canale trascurabile)

- Spettro di frequenza

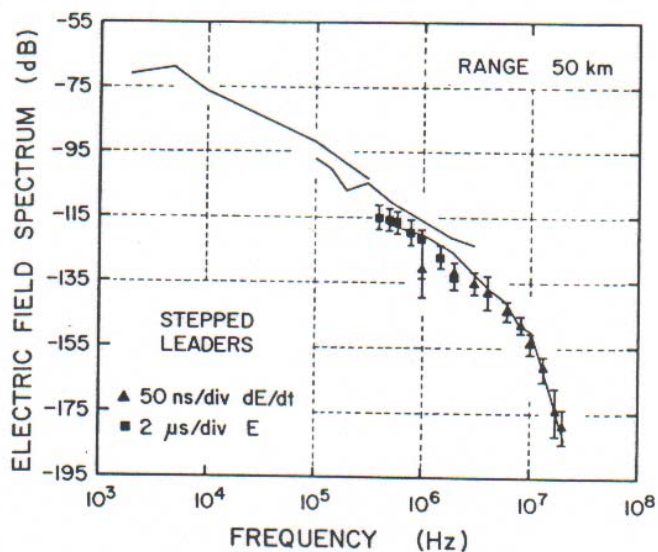


fig.1.3.13.

FASE FINALE INTERCETTAZIONE – SALTO FINALE

La fase finale prevede la formazione di una o più **controschiariche** quando il canale pilota si avvicina al suolo, ad un'altra nube o ad un oggetto in aria (*processo di attacco*)

Si definisce **distanza di intercettazione o di richiamo** (*striking distance*) d_s il valore della distanza del canale pilota per la quale si innesca una controschiarica di attacco.

Con riferimento in particolare alle linee ad alta tensione, su tale distanza sono state formulati tre modelli:

a) *teoria dell'altezza di scarica* (Schwaiger, Langrehr,...): il canale di fulmine avanza "indisturbato" fino ad una distanza H da terra dello stesso ordine dell'altezza h della struttura :

$$H = k \cdot h \quad (1 \leq k \leq 2)$$

$$d_s = h$$

b) *teorie della distanza di scarica*: il campo elettrico sul fronte del leader dipende dalla carica del leader ed è quindi legato alla successiva corrente di picco del fulmine

$$d_s = 10 \cdot I^{0.65}$$

c) *teorie del campo elettrico*, legato al fenomeno corona sulle strutture a terra durante l'avanzamento del leader: si ha controschiarica e quindi intercettazione quando il campo elettrico intorno alla struttura è maggiore del campo elettrico sulla testa del leader.

Queste teorie sono la base per il **progetto delle protezioni da fulminazione diretta** (funi di guardia)

Ramificazione (*Branching*) Osservata nel 50% dei canali discendenti (al suolo) e ascendenti (verso la nube).

Gli esperimenti di laboratorio indicano ramificazione all'elettrodo positivo.

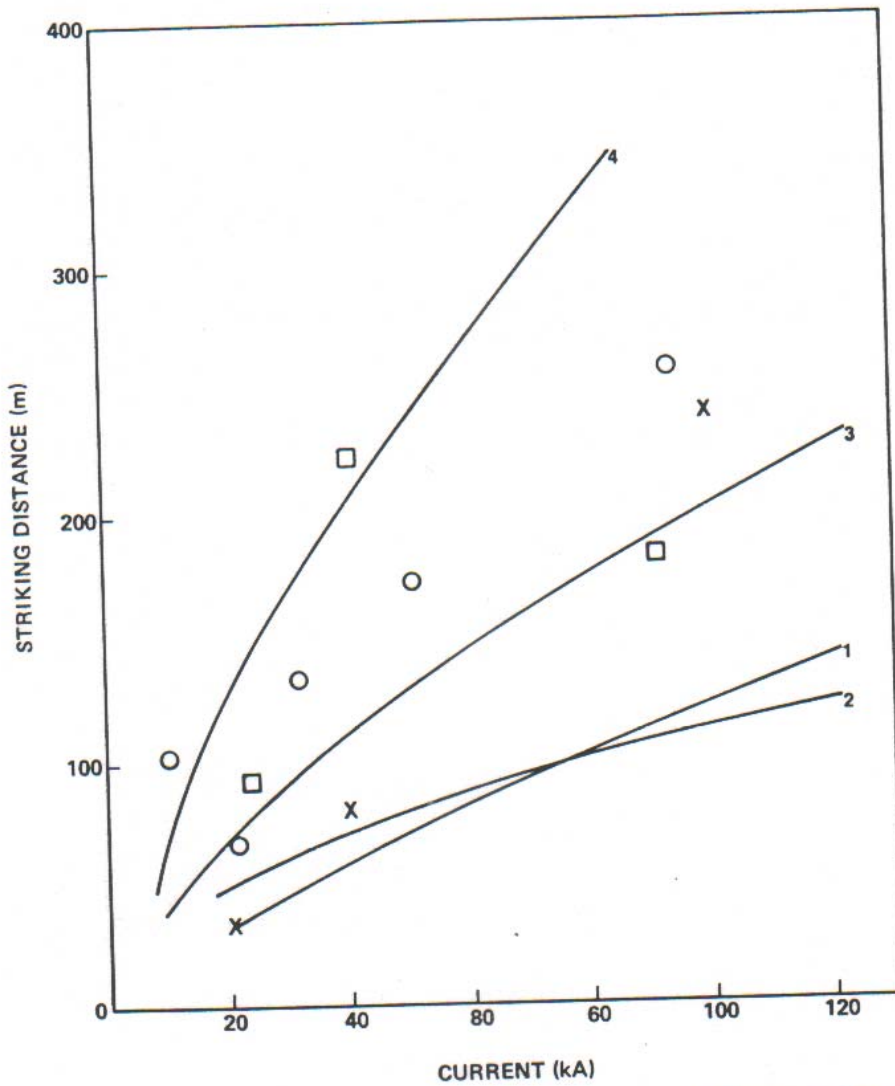


Fig. 15. Striking distance versus return-stroke peak current for objects attached to ground. [curve 1: Golde (1945); curve 2: Wagner (1963); curve 3: Love (1973); curve 4: Ruhling (1972); x: Davis (1962); o: estimates from 2-D photographs by Eriksson (1978); □: estimates from 3-D photography by Eriksson (1978)]. Adapted from Golde (1977) and Eriksson (1978).

COLPO DI RITORNO

Quando il canale di controscarica raggiunge il canale pilota, si ha una rapida variazione della conducibilità del canale schematizzata da un'"onda" di corrente di notevole intensità risalente il canale (*colpo di ritorno* o *return stroke*)

In letteratura sono stati effettuati studi su scariche 2D e confrontati con modelli teorici che considerano i seguenti processi:

- evoluzione della densità elettronica
- evoluzione della temperatura elettronica
- evoluzione della temperatura del gas

- **Caratteristiche del colpo di ritorno** in una scarica nube-terra:

- velocità di avanzamento dell'onda di corrente $0.1c \leq v \leq 0.5c$
- intensità tipiche di 30 kA
- salita : pochi microsecondi, con variazioni rapide sul fronte
- caduta: emivalore in $50 \mu s$
- temperature 30000 K
- studi sul campo a distanza e sulla derivata

MODELLO DEL COLPO DI RITORNO

- corrente alla base del canale (Rhouma,1997)

$$i(0,t) = \frac{I_{01}}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{\left[1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n\right]} e^{-\frac{t}{\tau_2}} + I_{02}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

$$I_{01} = 17.6 \text{ kA}; I_{02} = 17 \text{ kA}; \eta = 0,845$$

$$\tau_1 = 0.092 \mu\text{s}; \tau_2 = 10 \mu\text{s}$$

$$\alpha = 1.67 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}, \beta = 0.6 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$$

- correzione per "corona" (MTL, Rachidi,1989)

$$i(z,t) = i\left(0, t - \frac{z}{v}\right) e^{-\frac{z}{\lambda}} \quad z \leq h$$

$$i(z,t) = 0 \quad z > h$$

CAMPI GENERATI DAL FULMINE

Campo generato dal leader

Modello "a posteriori" di Ben Rouma, Auriol (fig.1 da Rouma)

$$\rho_{leader} = \frac{I_0}{v} \Big|_{rs}$$
$$E_z(M) = \int_{leader} \left(\frac{z' - z_0}{\left[(z' - z_0)^2 + D^2 \right]^{\frac{3}{2}}} - \frac{z' + z_0}{\left[(z' + z_0)^2 + D^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right) \frac{\rho(z')}{4\pi\epsilon_0} dz'$$

COMPONENTI DEL COLPO DI RITORNO

- Componente impulsiva viaggiante alla velocità v
- Componente "corona"
- Componente uniforme, legata al passaggio delle cariche libere

CAMPI GENERATI DAL FULMINE

Campo generato dal leader

Modello "a posteriori" di Ben Rouma, Auriol (fig.1 da Rouma)

$$\rho_{leader} = \frac{I_0}{v} \Big|_{rs}$$

$$E_z(M) = \int_{leader} \left(\frac{z' - z_0}{\left[(z' - z_0)^2 + D^2 \right]^{\frac{3}{2}}} - \frac{z' + z_0}{\left[(z' + z_0)^2 + D^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right) \frac{\rho(z')}{4\pi\epsilon_0} dz'$$

Considerando i momenti elettrici definiti dalle cariche in quota e dalla loro immagine

$$M' = \sum_i q_i (2H_i)$$

il campo elettromagnetico può essere espresso in funzione dei momenti

$$E = \frac{M}{4\pi\epsilon_0 D^3} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c D^2} \frac{dM}{dt} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2 D} \frac{d^2 M}{dt^2}$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi D^2} \frac{dM}{dt} + \frac{\mu_0}{4\pi c D} \frac{d^2 M}{dt^2}$$

Campo generato dal colpo di ritorno

$i(z, t)$ modello MTL

$$dE_z(r, z, z_0, t) = \frac{dz}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2(z-z_0)^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i\left(z, t - \frac{R}{c}\right) dt + \frac{2(z-z_0)^2 - r^2}{cR^4} i\left(z, t - \frac{R}{c}\right) - \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i\left(z, t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right]$$

$$dB_\theta(r, z, z_0, t) = \frac{\mu_0 dz}{4\pi} \left[\frac{r}{R^3} i\left(z, t - \frac{R}{c}\right) - \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i\left(z, t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right]$$

$$dE_r(r, z, z_0, t) = \frac{dz}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{3r(z-z_0)}{R^5} \int_0^t i\left(z, t - \frac{R}{c}\right) dt + \frac{3r(z-z_0)}{cR^4} i\left(z, t - \frac{R}{c}\right) - \frac{r(z-z_0)}{c^2 R^3} \frac{\partial i\left(z, t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right]$$

CAMPI MISURATI A MEDIA E LUNGA DISTANZA

SPETTRI DI FREQUENZA

DATI RIASSUNTIVI SUL FULMINE

	<i>Min</i>	<i>Medio</i>	<i>Max</i>
<i>Stepped leader</i>			
- lunghezza dello step [m]	3	50	200
- intervallo tra steps [μ s]	30	50	125
- velocità media di propagazione [m/s]	10^5	$1.5 \cdot 10^5$	$2.6 \cdot 10^5$
- carica depositata nel canale [C]	0.5	5	20
<i>Dart leader</i>			
- velocità di propagazione [m/s]	10^6	$2 \cdot 10^6$	$2.1 \cdot 10^6$
- carica depositata nel canale [C]	0.2	1	6
<i>Colpo di ritorno</i>			
- velocità di propagazione [m/s]	$2 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	$1.4 \cdot 10^8$
- ripidità del fronte [kA/ μ s] (-)	<1	10	>80
- ripidità del fronte [kA/ μ s] (+)	0.2	2.5	32
- tempo alla cresta [μ s] (-)	2	5	18
- tempo alla cresta [μ s] (+)	3.5	22	200
- valore della corrente di picco[kA] (-)	10	30	80
- valore della corrente di picco[kA] (+)	5	35	>300
- tempo all'emivalore[μ s] (-)	15	40	250
- tempo all'emivalore[μ s] (+)	25	230	2000
- carica trasferita nel canale [C] (-)	1.1	5	24
- carica trasferita nel canale [C] (+)	20	80	350
- lunghezza del canale [km]	2	5	14
<i>Corrente continuativa</i>			
- intensità [A]	10	100	500
- carica [C]	0.1	50	200
<i>Restrike</i>			
- numero di colpi	1	4	26
- intervallo tra colpi [ms]	3	40	100
- valore della corrente di picco[kA] (-)	5	12	30
- ripidità del fronte [kA/ μ s] (-)	12	40	120
- tempo alla cresta [μ s] (-)	0.2	1	5
- durata [μ s]	6.5	32	140
- carica trasferita	0.2	1.4	11

- durata totale [s]	0.01	0.2	2
Carica totale trasferita (-)	1.3	7.5	40
Carica totale trasferita (+)	20	80	350

EFFETTI DEL FULMINE

- ⇒ Effetti termici
- ⇒ Sollecitazione meccaniche
- ⇒ Emissione luminosa
- ⇒ Radiazione elettromagnetica
- ⇒ Emissione acustica
- ⇒ Reazioni chimiche

EFFETTI TERMICI

- ⇒ fusione dei metalli o deformazione
- ⇒ vaporizzazione
- ⇒ sviluppo di fiamme, combustione, incendi
- ⇒ innesco di miscele esplosive

Parametri fondamentali

- ⇒ Azione integrale (Energia specifica del fulmine)

$$J = \int_{\Delta t} I^2 dt$$

SOLLECITAZIONI MECCANICHE E ACUSTICHE

- sforzi elettrodinamici (implosione)
- deformazione ed espansione dei metalli, rilascio di gas (esplosione)
- Onda di pressione associata all'espansione del canale (bang a breve distanza, tuono a lunga distanza)

REAZIONI CHIMICHE

- formazione di ossigeno monoatomico e ozono

EFFETTI LUMINOSI

- Abbagliamento
- Accecamento di sensori ottici

***EFFETTI ELETTROMAGNETICI A MEDIA E LUNGA DISTANZA
(fulminazione indiretta)***

- sovratensioni indotte
- accecamento di sensori
- disturbi alle comunicazioni

SOVRATENSIONI SU STRUTTURE E LINEE DI TRASMISSIONE

- 1) Sovratensioni legate al campo elettromagnetico associato alle correnti di fulmine nelle varie fasi, in particolare nel return stroke (seminari paralleli)
- 2) Variazione nella distribuzione di carica indotta a causa della rapida ricombinazione di cariche specialmente nel caso di fulmine intranube

Esempio del secondo caso: linea di trasmissione con carica indotta $\lambda(x,t)$ [C/m] da una nube ³; all'istante $t=0$ il fulmine annulla la carica nella nube; la redistribuzione della carica sulla linea determina una distribuzione di tensione e corrente del tipo

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L' C' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C' \frac{\partial u}{\partial t}$$

Tipo di soluzione

$$u(x, t) = u_+(x - vt) + u_-(x + vt)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_0} [u_+(x - vt) - u_-(x + vt)]$$

$$v = \sqrt{\frac{1}{L' C'}}; \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

Condizioni iniziali

$$u(x, 0) = \frac{\lambda(x, 0)}{C'} = f(x)$$

$$i(x, 0) = 0$$

si deduce

$$u(x, 0) = u_+(x, 0) + u_-(x, 0)$$

$$0 = u_+(x, 0) - u_-(x, 0)$$

$$u_+(x, 0) = u_-(x, 0)$$

$$u_+(x, 0) = u_-(x, 0) = \frac{1}{2} f(x)$$

e quindi

$$u(x, t) = \frac{1}{2} [f(x - vt) + f(x + vt)]$$

$$i(x, t) = \frac{1}{2Z_0} [f(x - vt) - f(x + vt)]$$

³La linea di trasmissione è connessa a terra da catene di isolatori di resistenza R_{is} . Si prescinde dalla tensione di alimentazione, che tuttavia è supposta a neutro isolato.

La presenza di isolatori, terminazioni e scaricatori verso terra e discontinuità implica onde riflesse e rifratte.

La resistenza non infinita degli isolatori (specie in condizioni di contaminazione) smorza progressivamente il fenomeno.

FASI SUCCESSIVE AL PRIMO COLPO DI RITORNO

- **Corrente "continua"** di 40-150 A ("negativa") per 50-500 ms con carica media di 12C;
-in Giappone sono state registrate correnti di 10 kA per 3 ms (30 C "positivi").

- **Colpi successivi (restrike)**
 - entro 40-70 ms dal colpo di ritorno può svilupparsi un *continuous dart leader* (J-K processes) con velocità 1000-20000 km/s, carica 1C, non ramificato, durata 1ms.
 - Notevole attività VHF-UHF
 - successiva corrente "continua" (cariche "drenate" progressivamente dalla nube)
 - coinvolgimento di centri di carica sempre più in alto

ALTRI TIPI DI FULMINE

Scarica intranube

Ogawa and Brook (1964) hanno mostrato che le scariche partono dalla zona positiva in alto, con velocità di 10 km/s; alla fine della fase leader, si ha un colpo di ritorno, della durata di 100 ms, che si propaga a velocità di 1000 km/s coinvolgendo trasporto di carica dell'ordine del coulomb.

Variazione tipica di momento elettrico 100 C km.

Scarica nube-nube

Stepped leader e successivi 4-5 deboli colpi di ritorno (K-processes) lunghi 5-10 km , carica neutralizzata 10-30 C.

Spettri di frequenza simili a quelli della scarica nube-terra

PROVE

- prove di tensione diretta a rampa ripida o impulsiva
- prove di tensione indotta da corrente impulsiva
- **prove di corrente**

High-Current Damage Test Waveform

(onda classica a 4 componenti)

CONSIDERAZIONI GENERALI

Potenziali ed energie

Schonland (1964) ha stimato a 100-1000 MV la differenza di potenziale e terra prima del fulmine; assumendo la carica coinvolta pari a 20 C, l'energia del fulmine è di circa 10000 MJ, la potenza di picco è 37.5 GW, la potenza media di 600 W, dissipata in gran parte lungo il canale

Impossibile impiego di questa energia

PROSPETTIVE

Principali linee di interazione e sviluppo:

Attività prevalentemente teoriche:

- Individuazione di modelli semplificati per fenomeni di prebreakdown e stepped leader
- Analisi dei disturbi "generati" e confronto con dati sperimentali disponibili
- Approfondimento del modello teorico del colpo di ritorno
- Interazione a breve distanza sia durante la propagazione del leader che nelle (eventuali) fasi successive (fulmine a terra o intranube)

Attività teorico-sperimentali in sala AT:

- studio del meccanismo di attacco per strutture a terra o flottanti (in scala intera o ridotta)
- studio degli effetti termici dovuti alla corrente di fulmine tramite il banco di condensatori 8kV-160kJ.
- individuazione e classificazione dei "disturbi" durante una prova ad impulso atmosferico (in condizioni di tenuta e di scarica)

ALTRE CARATTERISTICHE DEL "MOVIMENTO" DEI FULMINI

Deviazioni (percorso a zigzag)

Ramificazione

Intercettazione











