

# VARIAZIONI DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO DOVUTE A SCARICHE ATMOSFERICHE E RELATIVI METODI DI STUDIO

HARALD NORINDER

*Introduzione.* — Circa 30 anni fa iniziai in Svezia una serie di ricerche sulle condizioni elettrofisiche nelle quali si producono le scariche atmosferiche e sui fenomeni susseguenti a queste.

Approfondendo l'esame della letteratura sul citato soggetto, trovai allora assai sorprendente il fatto che una questione di così grande importanza come lo studio del fulmine sotto l'aspetto del fenomeno elettromagnetico fosse stata oggetto di indagini così limitate. Ciò mi sembrava tanto più strano in quanto i disturbi ed i danni provocati dal fulmine divenivano di importanza sempre maggiore, soprattutto considerando i guasti, talvolta gravissimi, provocati dal fulmine sulle linee di trasmissione dell'energia elettrica ed i disturbi e gli inconvenienti di vario genere sulle linee telefoniche e nelle radio comunicazioni.

Aggiungendo poi la considerazione che i danni causati dal fulmine alle persone, animali, edifici ed altri oggetti collegati al suolo costituiscono accidenti gravi e da tempo immemorabile, evidenti, era ovvio pensare che tutto ciò avrebbe dovuto indurre a una maggiore penetrazione nell'intricato complesso di fenomeni elettrofisici inerenti alle scariche atmosferiche.

1. — *Prime considerazioni sulla natura dei fenomeni relativi alle scariche atmosferiche.* — Prima del rapido sviluppo delle comunicazioni elettriche, nei primi venti anni di questo secolo, gli studi sui problemi relativi alle scariche atmosferiche erano rivolti soprattutto alla ricerca di dati utili per il progetto dei dispositivi parafulmini per la protezione degli edifici.

A questo scopo interessava in maniera preminente la determinazione dei probabili valori dell'intensità della corrente perché questi appunto avevano importanza determinante nel dimensionamento del sistema protettivo.

Nella letteratura su questo soggetto incontriamo molti nomi di ben noti fisici che portarono il loro contributo nella valutazione dei probabili valori della corrente dei fulmini. Dagli effetti di fusione prodotti da un fulmine passante attraverso un conduttore metallico, si giunse alla conclusione che i valori della corrente dovevano variare tra 10.000 e 50.000 amp. Questi valori sono in sorprendente accordo con i valori della corrente che risultarono da metodi più moderni e più sicuri.

Un metodo molto interessante ed importante per misurare la corrente del fulmine e il suo valore di punta fu ideato da Pockels (<sup>1</sup>), il quale pensò di sfruttare la magnetizzazione residua del basalto. Barre

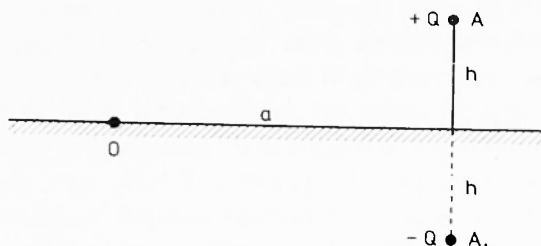


Fig. 1

di basalto lunghe circa 4 cm e con una sezione rettangolare di 1 cm furono montate ad una distanza di 6 cm dal conduttore di terra del parafulmine. Quando il conduttore era attraversato dalla corrente del fulmine, la barra si magnetizzava. Pockels poté valutare i valori della corrente del fulmine mediante confronto con i valori di magnetizzazione ottenuti mediante una corrente nota data da una batteria di accumulatori. Nei suoi primi esperimenti Pockels misurò dei valori massimi delle correnti dei fulmini di 6400, 6600 e 10800 amp. In alcuni esperimenti successivi su un sistema di parafulmini sul monte Cimone, negli Appennini, Pockels misurò il più alto valore della corrente che risultò di 11.000 amp. Questi valori sono in buon accordo con le misure effettuate più tardi con un metodo in cui si usava ancora il principio di Pockels. Tali misure sono state effettuate in alcuni paesi. Barrette magnetiche furono poste in vicinanza di decine di migliaia di fili di terra di linee elettriche ad alta tensione. Al basalto si sostituiva un fascio di fili di acciaio molto sottili aventi un elevato magnetismo residuo.

Riguardo alla questione molto importante, se le scariche dei ful-

mini fossero unidirezionali o oscillatorie, prima del 1920 non si avevano che opinioni molto vaghe. Un illustre scienziato elettrotecnico americano, che aveva speciali ed importanti interessi per occuparsi della struttura variabile delle scariche dei fulmini, dichiarò senz'altro che si trattava di scarica oscillante con una frequenza di 6 milioni di periodi al secondo. Ora, canali di scarica della lunghezza di almeno 2 km e spesso molto maggiore, attraversati da così forti correnti e con la pretesa alta frequenza dovrebbero produrre enormi radio-disturbi.

Nel servizio di radio-diffusione, allora agli inizi, tali disturbi erano del tutto ignoti. L'ipotesi della scarica oscillante con frequenza enormemente alta doveva già per questo fatto essere abbandonata.

Obbiezioni teoriche contro l'ipotesi della scarica oscillatoria ad elevata frequenza, sono state sollevate da Humphreys (7). Questi ha calcolato la probabile capacità rispetto alla terra di una nube temporalesca che veniva scaricata da un fulmine e nello stesso tempo ha valutato la probabile autoinduzione del canale del fulmine. Usando il ben noto circuito di scarica di Thompson, Humphreys, poté calcolare le condizioni necessarie affinché la scarica fosse oscillatoria e

stabilire che bastava il piccolo valore di 200 ohm km della resistenza nel canale di scarica per impedire ogni possibilità di oscillazione nel canale stesso. Di recente è stato possibile effettuare

misure (Norinder-Karsten) (8) della resistenza di tragitti artificiali di scarica percorsi da correnti dello stesso ordine di grandezza di quelle che si hanno nei fulmini naturali. La ricerca ha dato valori di 2000 ohm km, da cui segue che l'ipotesi di una scarica oscillatoria dei fulmini deve essere assolutamente abbandonata.

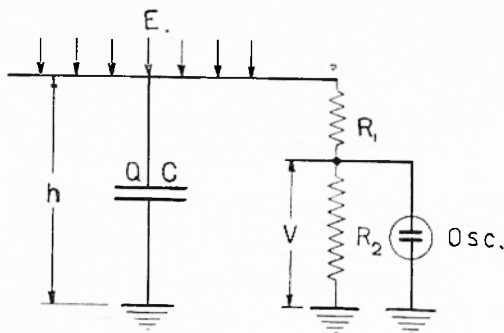


Fig. 2

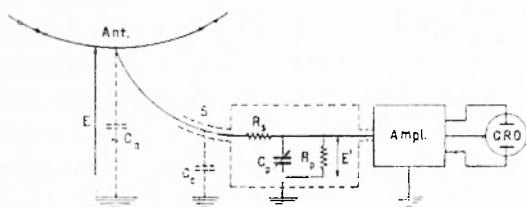


Fig. 3

Anche nei riguardi del probabile valore dell'intensità del campo elettrico necessario per produrre attraverso un tratto lungo uno e persino più chilometri, la scarica del fulmine dalla nuvola attraverso l'atmosfera fino a terra, sussistevano, al principio del 1920, concezioni molto errate. Si consideravano probabili valori intorno a 10.000 volt/metro. Come è noto, il valore corrispondente del campo tra sfere nella normale aria di laboratorio, è di un altro ordine di grandezza e cioè di circa 3.000.000 volt/metro. Non esisteva alcuna prova che le pro-

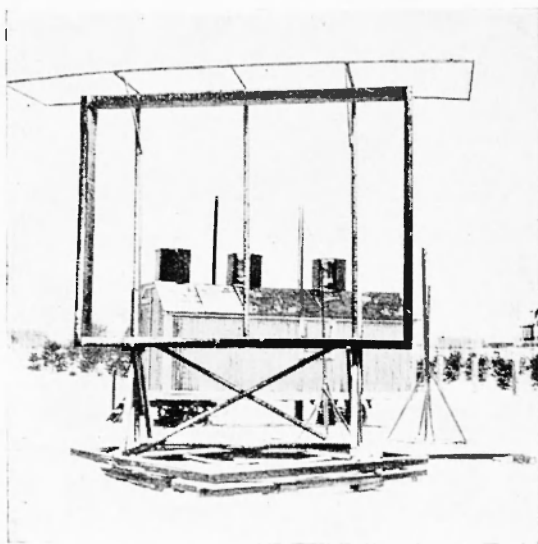


Fig. 1

proprietà dell'aria entro un'atmosfera temporalesca fossero in grado di diminuire la resistenza di scarica dell'aria. Questa errata opinione prevale ancora specialmente tra quelli che non si sono ancora occupati di esperienze pratiche negli studi di scariche ad alta tensione. Per es., in una ben nota pubblicazione edita recentemente due autori sostenevano quanto segue: la superficie in una nube temporalesca, che sarebbe necessaria per mantenere la scarica di un fulmine proveniente da una nube temporalesca, dovrebbe essere dell'ordine di 100 km<sup>2</sup>. Questi valori debbono crollare per la loro stessa absurdità. Detti valori diventano assolutamente impossibili, quando si consideri che molto spesso uno stesso canale è attraversato da un notevole numero di scariche successive. Inoltre, un considerevole numero di fulmini può provenire da una nube entro pochi minuti. Poiché ogni folgore consta di diversi impulsi di corrente uno dietro l'altro nello stesso canale è evidente l'assurdità dell'ipotesi. La ragione della conclusione sopra citata è che la intensità del campo di una nube temporalesca è stata del tutto sottovalutata mentre la carica trasportata in una scarica è stata sopravvalutata. Da qualche tempo misure molto

proprietà dell'aria entro un'atmosfera temporalesca fossero in grado di diminuire la resistenza di scarica dell'aria. Questa errata opinione prevale ancora specialmente tra quelli che non si sono ancora occupati di esperienze pratiche negli studi di scariche ad alta tensione. Per es., in una ben nota pubblicazione edita recentemente due autori sostenevano quanto segue: la superficie in una nube temporalesca,

importanti e interessanti delle intensità del campo entro nubi temporalesche sono state effettuate da Gunn (1). Furono usati laboratori volanti su aerei lanciati entro nubi temporalesche; furono adoperati speciali voltmetri elettrostatici a registrazione automatica. Essi vennero disposti sotto la carlinga di aeroplani (furono adoperati un bombardiere pesante B17 ed un bombardiere medio B25). Vennero registrati valori della intensità del campo di 100.000 volt/metro e fino a 200.000 volt/metro. Fu registrato un valore di 300.000 volt/metro quando il bombardiere venne sfiorato da un fulmine. Dai valori della intensità del campo ottenuti si può dedurre una conclusione molto importante. Entro una nube temporalesca lo spazio carico che è necessario per fornire le cariche trasportate in una o più scariche di fulmine lungo il canale dalla nube a terra, non

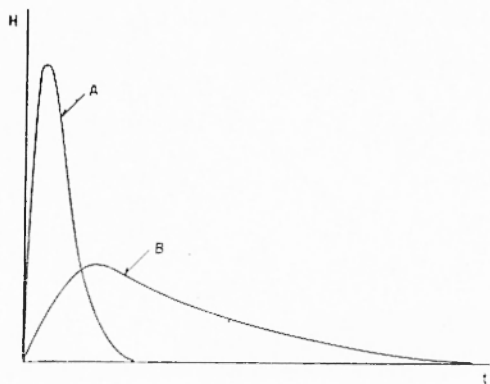


Fig. 5

è necessario sia di molto grande estensione. Con valutazioni opportune e col calcolo è facile trovare che il volume, dal quale è fornita la carica in un fulmine, deve corrispondere ad una sfera avente il diametro compreso tra 200 e 500 metri. In casi eccezionali il diametro potrà raggiungere valori maggiori, sino a 100 metri. La grandezza del volume dipende in primo luogo dai valori della corrente nelle scariche stese. Come si vedrà da quanto segue, questi valori variano entro limiti considerevoli.

2. — *Effetti del fulmine sul campo elettrico e magnetico.* — Per rendersi ragione, in una prima visione qualitativa, del modo con cui la perturbazione elettromagnetica prodotta dal fulmine varia con la distanza dal canale di scarica si può ricorrere al noto metodo delle immagini elettriche di Lord Kelvin (2).

Supponiamo il caso più semplice, cioè che un fulmine verticale scoppi tra la terra e lo spazio carico della nube. Supponiamo che la carica sia concentrata in un punto. Come è noto questa approssimazione è consentita, se si suppone che la carica abbia una distribu-

zione omogenea entro una sfera. (A questo riguardo vale la pena di menzionare due altri casi, in cui, seguendo la teoria del potenziale, una distribuzione omogenea della carica entro un certo volume porta a risultati semplificati. Ciò si ha, quando la carica è distribuita entro un cono o un cilindro con le loro rispettive superfici di base disposte

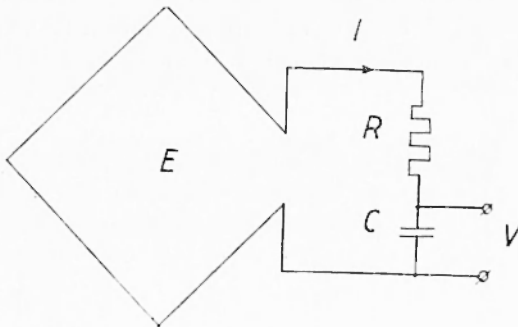


Fig. 6

parallelamente alla superficie terrestre).  
 Con riferimento alla fig. 1 supponiamo che la parte carica della nube possa essere considerata come concentrata in un punto  $A$  ad una distanza  $d$  da  $O$  e ad una altezza  $h$  sul suolo. Supponiamo inoltre che la carica abbia il valore  $+Q$  e la corrente il valore  $I$  nell'istante  $t - \frac{d}{c}$ , dove  $c$  rappresenta la velocità della luce. Secondo la teoria delle immagini elettriche possiamo considerare l'azione di una scarica tra il punto  $A$  e la terra nel modo seguente: oltre alla carica  $+Q$  nel punto  $A$  considerare la stessa carica con il segno cambiato  $-Q$  nel punto  $A'$  situato simmetricamente ad  $A$  rispetto alla terra e nel circuito della scarica due correnti aventi la stessa intensità  $I$ , una passante da  $A$  alla terra e l'altra, nella stessa direzione, dalla terra verso  $A'$ .

Secondo un'analisi di Lejay <sup>(6)</sup> è possibile applicare le equazioni generali di Maxwell al circuito della scarica. Egli ha anche fornito soluzioni generali nel caso di direzioni diverse dalla verticale rispetto alla terra. È possibile effettuare il calcolo anche per scariche tra due regioni entro la nube.

Nel caso qui considerato, l'azione elettrica nel punto  $O$ , situato alla distanza  $d$ , può essere rappresentata da un vettore  $F$  perpendicolare alla superficie del suolo e diretto verso il basso. L'espressione

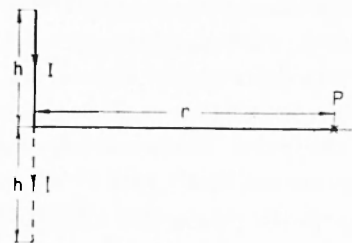


Fig. 7

del vettore in unità elettromagnetiche C.G.S. è data, nella ipotesi che  $d$  sia grande rispetto ad  $h$ , dalla equazione [1].

$$F = c^2 \cdot \frac{2h}{d^3} Q + c \frac{2h}{d^2} \cdot I + \frac{2h}{d} \frac{dI}{dt} \quad [1]$$

Qui  $c$ , come prima, rappresenta la velocità della luce ( $3 \cdot 10^{10}$  cm/sec).

Ponendo  $I = \frac{dQ}{dt}$  otteniamo [2]

$$F = c^2 \cdot \frac{2h}{d^3} Q + c \frac{2h}{d^2} \frac{dQ}{dt} + \frac{2h}{d} \frac{d^2 Q}{dt^2} \quad [2]$$

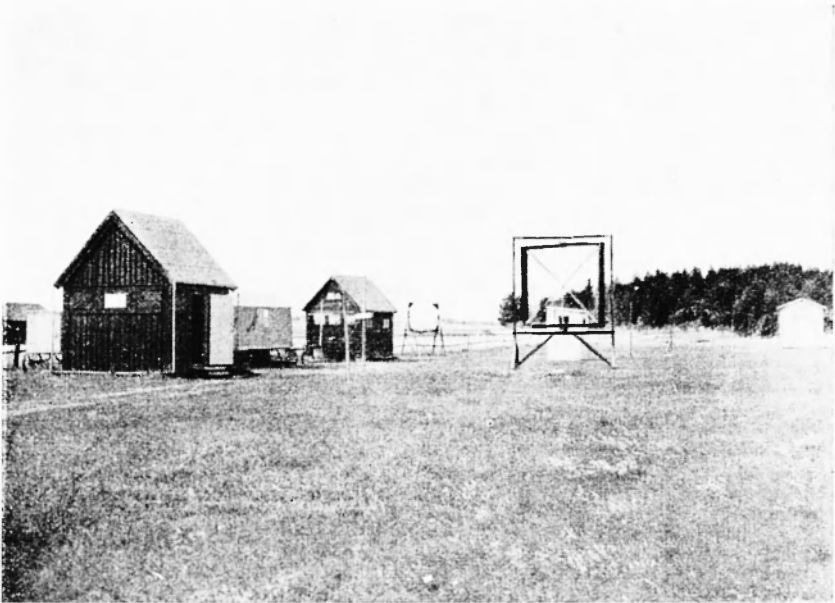


Fig. 8

Il vettore campo magnetico  $H$ , è nel medesimo punto perpendicolare al piano formato da  $O$  e dal canale del fulmine ed è espresso da [3].

$$H = \frac{2h}{d^2} I + \frac{1}{c} \frac{2h}{d} \frac{dI}{dt} \quad [3]$$

I tre termini che entrano nella espressione [2] del campo elettrico rappresentano rispettivamente il campo elettrostatico, il campo di induzione e il campo di radiazione. La distanza entra con un fattore  $\frac{1}{d^3}$  nel primo, con  $\frac{1}{d^2}$  nel secondo e con  $\frac{1}{d}$  nel terzo termine. I relativi

valori dei termini variano quindi notevolmente con la distanza dal canale del fulmine. Questo si può rilevare da alcuni valori di  $I$ ,  $Q$  e  $dI/dt$ , che sono stati dedotti da alcune nostre personali ricerche (6). Questi valori sono dati nella tabella I.

La tabella I contiene i valori di  $I$ ,  $dI/dt$  e  $Q$ , che si sono potuti misurare in casi reali.

D'altra parte non sarebbe opportuno dare troppa considerazione ai calcoli summenzionati basati sulla [2]. La ragione è che nelle scariche reali di fulmini noi troveremo, come si ricava da nostre misure rapide variazioni nella intensità della corrente di un fulmine. Ciò darà luogo ad una variazione di  $dQ/dt$  di complicata struttura con rapidi cambiamenti in su e in giù. Ciò è stato discusso da Maurain (7) nella sua pubblicazione sui fulmini e temporali. Se consideriamo la variazione di  $\frac{d^2Q}{dt^2}$  questo termine deve presentare molto spesso variazioni di segno. Così un diagramma di variazioni rilevato da una

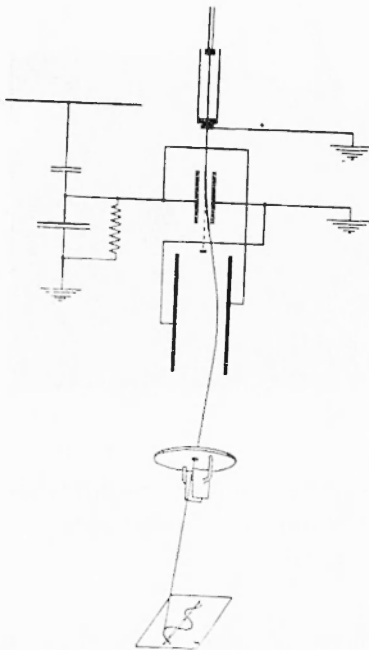


Fig. 9

reale scarica di fulmini, che rappresenta una scarica unidirezionale tra le nubi e la terra non presenterà mai un andamento di variazione regolare.

Come è stato verificato dall'Autore (8) segue che: le variazioni del campo elettrico prodotte da una scarica del fulmine, che è unidirezionale, non hanno più carattere unidirezionale non appena ci si allontana di un certo tratto dal canale. La struttura di variazione diviene talvolta molto complicata appunto per l'influenza del secondo e terzo termine dell'equazione [2].

Perciò anche nel caso in cui non si presentino altri fattori, oltre quelli che derivano dalla struttura della variazione primaria nella scarica stessa, bisogna andare cauti nell'apprezzare i risultati dei calcoli

sopra menzionati. Ma vi sono altre cause che rendono ancor più incerto il calcolo.

La perturbazione elettromagnetica che proviene dalla scarica del

TABELLA I

Distanza	Termine elettrostatico $c^2 \frac{2h}{d^3}$		Termine di induzione $\frac{2b}{c} \frac{I}{d^2}$			Termine di radiazione $\frac{2h}{d} \frac{dI}{dt}$		
	5 coul	10 coul	10000 A	50000 A	500 A/sec	1000 A/sec	2000 A/sec	
5 km	11,4 V/cm	23,3 V/cm	0,43 V/cm	2,4 V/cm	0,4 V/cm	0,3 V/cm	1,6 V/cm	
16 km	1,3 »	3,6 »	$1,2 \cdot 10^{-1}$ »	0,6 »	0,2 »	0,1 »	0,3 »	
100 km	$1,6 \cdot 10^{-3}$ »	$3,6 \cdot 10^{-3}$ »	$1,2 \cdot 10^{-3}$ »	$6 \cdot 10^{-3}$ »	0,02 »	0,04 »	0,08 »	
1000 km	$1,8 \cdot 10^{-6}$ »	$3,6 \cdot 10^{-6}$ »	$1,2 \cdot 10^{-5}$ »	$6 \cdot 10^{-5}$ »	0,002 »	0,004 »	0,008 »	

La tabella contiene i valori di  $Q$ ,  $I$  e  $\frac{dI}{dt}$  che sono stati misurati in casi reali.

fulmine deve passare attraverso l'atmosfera ionizzata, nella quale la ionizzazione può talvolta variare considerevolmente da una zona all'altra. Ciò influisce sulla propagazione delle onde elettromagnetiche in maniera diversa a seconda delle diverse frequenze ed inoltre la velocità di propagazione è differente per i diversi gruppi di frequenze. Si hanno quindi per questi motivi modificazioni addizionali della forma della curva degli atmosferici durante il loro passaggio attraverso l'atmosfera. Non è possibile fare un calcolo preliminare o prevedere tali effetti.

Come ulteriore complicazione dobbiamo considerare l'influenza della riflessione degli strati superiori della ionosfera. Infine non vi è dubbio che a volte dobbiamo considerare la presenza di strati ionizzati entro nubi temporalesche, che hanno confini netti. Nel loro tragitto gli impulsi, in condizioni temporalesche, debbono molto spesso penetrare attraverso gruppi di altre nubi temporalesche adiacenti. Le discontinuità della ionizzazione, in tali casi, possono influenzare molto la forma dell'impulso di un fulmine. Quindi è evidente che ricerche sulla variazione completa di forma e di aspetto delle scariche di fulmine al variare della distanza dal canale del fulmine debbono essere condotte in primo luogo con indagini sperimentali sistematiche. Come sarà spiegato in seguito, in altro capitolo, per ricerche di questo tipo sarà necessario analizzare le trasformazioni degli atmosferici nei singoli casi usando stazioni di registrazione a distanze dai canali dei fulmini opportunamente scelte.

3. — *Metodi per misurare le variazioni del campo elettrico provocate da scariche di fulmini ed atmosferici.* — La misura delle variazioni delle componenti del campo elettrico prodotto da una scarica di fulmine a diverse distanze dal canale di scarica si fa mediante una opportuna antenna lineare. Questa disposizione è stata usata dall'Autore (<sup>18</sup>) quando scoprì la prima volta forme aperiodiche di variazione delle scariche dei fulmini. Lo stesso metodo è stato applicato da Appleton e Watt (<sup>19</sup>) nel primo studio della forma di variazione degli atmosferici.

In relazione alla fig. 2 il circuito di antenna deve essere disposto parallelamente al livello orizzontale del terreno in una regione aperta e non disturbata. Quindi possiamo considerare il filo dell'antenna disposto su una superficie equipotenziale. Consideriamo che la intensità

nel campo abbia il valore  $E$  in volt/metro; allora supponendo il caso che le linee di forza del campo siano dirette verticalmente, il potenziale all'altezza  $h$  è  $hE$ . Per ridurre le oscillazioni proprie del circuito di antenna provocate da qualche rapida variazione della scarica del fulmine, si introduce una resistenza di smorzamento  $R_1$  insieme con la resistenza di misura  $R_2$ . La tensione ai capi di questa ultima resistenza è portata alle placche deviatrici di un oscillografo. In parallelo con le placche di deviazione si può introdurre, se è necessario, una capacità variabile per regolare la tensione di deviazione. Se si introduce questa capacità si dovrà tenere conto di essa nei calcoli seguenti.

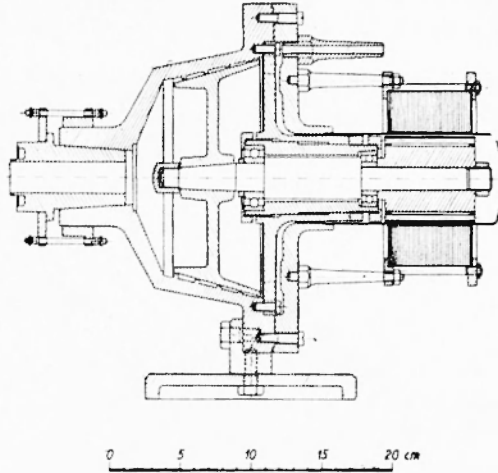


Fig. 10

La relazione tra  $V$  ed  $E$  è data dall'equazione [4]

$$\frac{dE}{dt} = \frac{R_1 + R_2}{hR_2} \left\{ \frac{dV}{dt} + \frac{V}{(R_1 + R_2)C} \right\} \quad [4]$$

In un caso speciale abbiamo  $R_1 \ll R_2$  (ad es.  $R_1 = 250$  ohm  $R_2 = 20.000$  ohm) ed  $R_1$  si può allora trascurare rispetto ad  $R_2$ . Ciò considerato e fatto  $R_2 = R$  otteniamo

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{h} \left\{ \frac{dV}{dt} + \frac{V}{RC} \right\} \quad [5]$$

Il segno del membro di destra dipende dal modo col quale si determina il segno della tensione oscillografica. Usando il segno di  $E$ , così che le linee di forza siano dirette verso terra e supponendo un aumento della intensità del campo col tempo, il risultato sarà un segno positivo del membro a destra della [5]; il prevalere di uno dei due  $dV/dt$  o  $(1/RC)V$  dipende dalla inclinazione della curva registrata e

dal valore di  $RC$ . Con un piccolo valore di  $R$  abbiamo approssimativamente

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{hRC} V \quad \text{o} \quad E = \frac{1}{hRC} \int V dt \quad [6]$$

ossia in questo caso il secondo termine è quello che prevale. Per ottenere la variazione della intensità del campo  $E$  dobbiamo integrare in tal caso le curve oscillografiche. Questo è chiamato il metodo di  $dE/dt$ .

Con un alto valore di  $R$ , la [5] sarà invece trasformata in

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{h} \frac{dV}{dt} \quad \text{o} \quad E = \frac{1}{h} V \quad [7]$$

In questo caso si può ricavare direttamente la variazione della intensità del campo senza integrazione. Questo è chiamato il metodo di  $E$ .

Il metodo più laborioso di  $dE/dt$  è usato nei casi in cui le misure in campagna sono eseguite in un punto ove disturbi locali, provenienti ad es. dalle linee ad alta tensione, perturberebbero i risultati. Per le misure in campagna è sempre preferibile scegliere una località in cui nessun disturbo locale possa perturbare le misure. In tal caso si ha ampia libertà di usare, se necessario, ambedue i metodi di misura.

Il metodo  $E$  dipende dall'isolamento del circuito di antenna, e questo problema è stato discusso in particolare da Norinder-Nordell <sup>(1)</sup>.

In generale sarà consigliabile far funzionare una stazione da campo con due antenne, una alta pochi metri da terra per le operazioni da effettuarsi quando la zona temporalesca dei fulmini è vicinissima e si è in condizioni pericolose ed un'altra, ad es. di una diecina di metri, da mettere in funzione nel caso in cui i canali dei fulmini sono a maggiore distanza e specialmente quando vengono registrati atmosferici. I due sistemi debbono essere disposti in modo che i loro campi non interferiscano uno con l'altro. Questo è importante, specialmente in quelle situazioni in cui, per ragioni di sicurezza, il temporale è vicinissimo e si richiede un collegamento a terra del sistema dell'antenna alta.

In generale è preferibile collegare il circuito di antenna con l'oscillografo a raggi catodici su un amplificatore aperiodico di alta qualità. Nel caso di registrazione di atmosferici prodotti da fulmini distanti ciò evidentemente è necessario.

Nella fig. 2 è riprodotto uno schema tipico del circuito di antenna usato nella stazione da campo dell'istituto per le ricerche sull'alta tensione. L'antenna è collegata con l'oscillografo a raggi catodici per mezzo del cavo schermato  $S$  avente capacità  $C_c$ , le resistenze  $R_s$  e  $R_p$ , la capacità variabile  $C_p$  e l'amplificatore  $A$ . Riferendoci

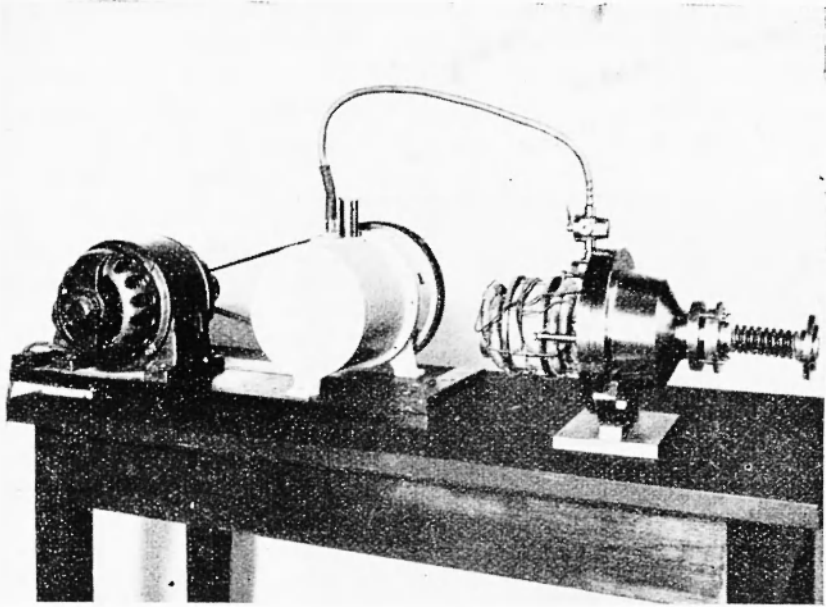


Fig. II

alla fig. 3, i valori ordinariamente usati nelle stazioni da campo in condizioni normali di funzionamento erano

$$C_a = 100 - 300 \mu\mu F ; C_c = 0,001 \mu F ; C_p = 0,001 - 0,1 \mu F ; \\ R_p = 5 \text{ meg}\Omega ; K_s = 50\Omega.$$

La relazione tra la tensione di  $E$  ed  $E'$  deve essere calcolata considerando i valori di  $C_a$ ,  $C_c$  e  $C_p$ .

Invece dell'antenna lineare Appleton e Chapman <sup>(12)</sup> usarono un altro tipo di antenna, introdotto per la prima volta da Wilson <sup>(13)</sup>. Veniva misurata la carica indotta, provocata dal passaggio di una scarica di fulmine, su un sfera isolata di rame montata su un palo verticale. Il circuito del sistema aereo consisteva in un elettrometro a valvola, un amplificatore con accoppiamento resistenza-capacità ed un oscillografo a raggi catodici registratore.

4. — *Metodi per misurare le variazioni del campo magnetico dovute a scariche di fulmini.*

a) *Apparecchiature esterne.*

All'Istituto per le ricerche sull'alta tensione sono stati studiati speciali metodi (<sup>14-17</sup>) per misurare le variazioni del campo magnetico prodotte dal passaggio di una scarica di fulmine. Essi si valgono dell'impiego di un aereo a quadro in collegamento con un amplificatore ed un oscillografo a raggi catodici.

L'aereo a quadro deve avere solo poche spire per eliminare le oscillazioni proprie delle spire. Con poche spire la frequenza propria è tanto alta da passare attraverso lo amplificatore e gli oscillografi senza produrre disturbi.

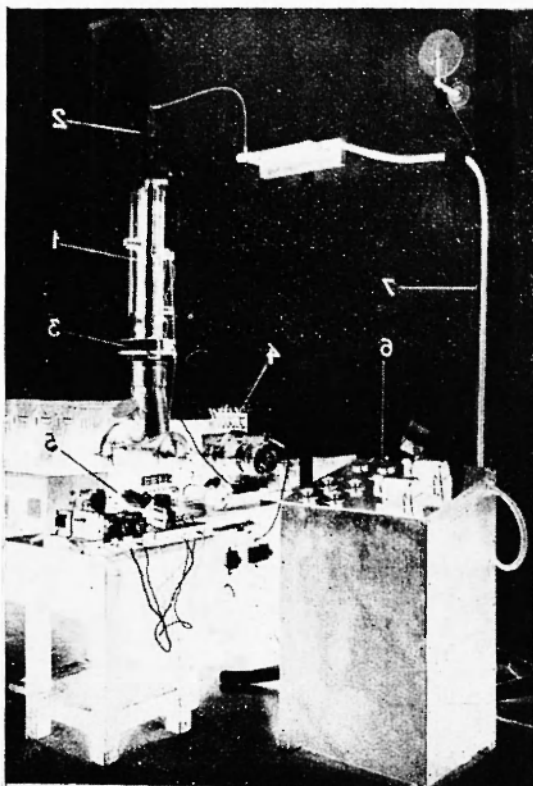


Fig. 12

Una conveniente realizzazione di tale quadro si può ottenere con due sole spire per quadro, ad esempio  $3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ . Una distanza di 5 cm fra le spire è quella adatta: il filo delle spire è montato su piccoli isolatori di porcellana fissati su un telaio di legno. Per misurare la componente delle scariche di fulmine verticali il quadro deve poter ruotare in piani verticali. La fig. 4 riproduce l'aereo in parola.

Il problema più difficile da risolvere nell'applicazione del metodo dell'aereo a quadro era quello di eliminare ogni influenza del campo elettrico onde ottenere le pure variazioni del campo magnetico. Dapprima fu sperimentato un dispositivo schermante costituito

di un unico manicotto in reticella metallica avvolgente completamente le spire del quadro collegato a terra. Questa schermatura era interrotta in un punto per evitare che costituisse una spira chiusa. Tale dispositivo non era però esente del tutto da inconvenienti specialmente nel caso di impulsi brevi ed intensi; si venivano a creare infatti distorsioni tali che un impulso del tipo *A*, nella fig. 5, veniva convertito nel tipo *B*. Per evitare distorsioni fu tentato allora un dispositivo schermante costituito da un sistema di manicotti in reticella metallica separati l'uno dall'altro e collegati a terra, avvolgenti le spire del quadro. Tutto il circuito di antenna fu così schermato, ma, malgrado questa precauzione, fu osservato un piccolo effetto di distorsione dovuto al campo elettrico. Questo disturbo è stato evitato con un ulteriore tetto schermante al di sopra del quadro e collegato a terra sullo chassis dell'amplificatore.

#### b) Principi delle misure.

Le misure delle variazioni del campo magnetico furono effettuate sfruttando l'induzione magnetica sull'aereo a quadro. Se la intensità del campo  $H_q$  in unità cgs, la superficie del quadro in  $\text{cm}^2$   $A$ , il numero di spire  $n$ , l'angolo tra il campo e l'asse della spira  $\varphi$ , si ha per  $E$  la seguente espressione:

$$E = nA \frac{dH_q}{dt} 10^{-8} \cos\varphi \quad [8]$$

dove  $E$  rappresenta la tensione indotta tra gli estremi delle spire, espressa in volt. Essa è direttamente proporzionale alla derivata prima del campo magnetico ed è perciò necessario integrare le curve registrate per avere la variazione di campo magnetico.

La condizione necessaria per una integrazione è che la derivata nelle parti decrescenti della curva non sia troppo piccola in confronto della corrispondente derivata nella parte crescente frontale della curva. Ma in ogni caso il dover integrare le curve oscillografiche è sempre un inconveniente. Di conseguenza è stato sviluppato uno speciale metodo di integrazione <sup>(15)</sup> in cui la integrazione è effettuata dallo stesso oscillografo a raggi catodici durante il processo di registrazione.

Il principio del metodo è illustrato dalla fig. 6. Nel quadro la tensione indotta, secondo la [8], è data da:

$$E = A \cdot dH_q/dt \cdot 10^{-8} \text{ (volt)} \quad [9]$$

Se  $R > \frac{1}{pC}$ , si provocherà una corrente  $I = \frac{E}{R}$ . Questa corrente carica il condensatore  $C$  alla tensione  $V$ , dove  $V = \frac{1}{C} \int_0^t Idt =$

$$= \frac{1}{RC} \int_0^t Edt = \frac{10^{-8}}{RC} \int_0^t A \cdot \frac{dH_q}{dt} dt = \frac{A \cdot 10^{-8}}{RC} \int_0^t dH_q =$$

$$= \frac{A \cdot 10^{-8}}{RC} H_q \text{ (volt)} \quad [10]$$

La condizione perché ne consegua una integrazione corretta è

che  $R \gg \frac{1}{pC}$ . Quindi

la tensione applicata al condensatore deve essere molto piccola in confronto della tensione applicata alla resistenza. Questa è all'incirca la stessa della tensione al quadro. La tensione indotta nell'amplificatore sarà più notevole in proporzione ad un aumento nel prodotto  $RC$  del circuito di integrazione. Di conseguenza deve aversi una condizione importante: devesi poter disporre di una amplificazione abbastanza alta per consentire una compensazione della notevole diminuzione della tensione indotta che si ha in conseguenza dell'a-

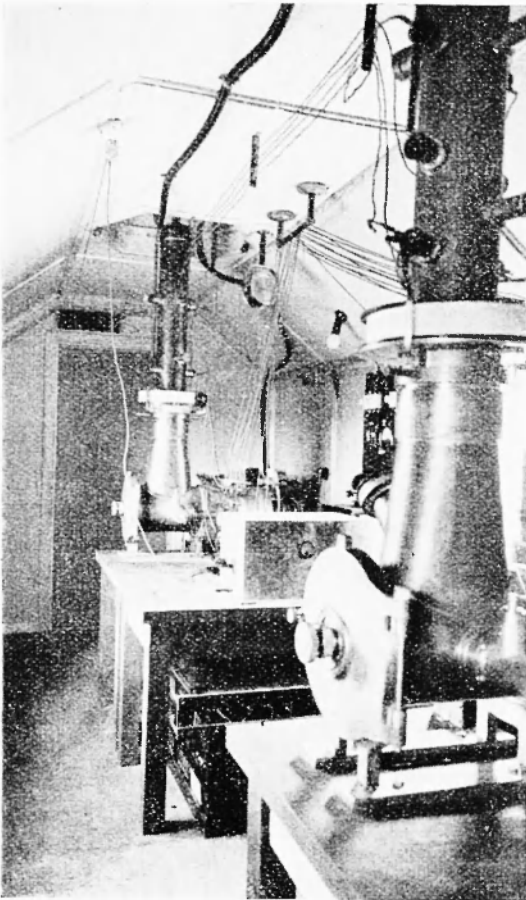


Fig. 13

dottato procedimento di integrazione. In collegamento con l'aereo a quadro viene disposta una resistenza tra l'estremo di griglia dell'aereo ed il suo cavo di collegamento. Ciò affinché la capacità del cavo non diminuisca la frequenza propria dell'aereo in modo che questa non esca dalla gamma di lavoro dell'amplificatore. Questa resistenza è usata come resistenza di integrazione e come tale è limitata a 100 kilohm. La capacità del cavo di collegamento sarà così in parallelo con il condensatore di integrazione. Quando questo ha un valore di circa 3000  $\mu\text{u} F$ , la capacità del cavo non avrà importanza. I valori menzionati per la capacità e la resistenza danno luogo ad un tempo di rilassamento di 3 millisecondi. Quindi con impulsi di piccola durata rispetto a questo tempo l'integrazione avrà luogo senza errore. Per impulsi di maggiore durata è possibile introdurre, come si è dedotto in un lavoro originale (<sup>16</sup>), una correzione:

$$H_q = \frac{10}{A} \left[ RCF + \int I dt \right] \quad [11]$$

Fra i due termini compresi nella parentesi prevale il primo sul secondo, di quest'ultimo può farsi una valutazione approssimata mediante integrazione grafica del diagramma  $V=V(t)$ ; trascurando il secondo termine nella maggior parte dei casi, non si commette errore sensibile.

Gli aerei a quadro usati sono costruiti con piccole aree di avvolgimento e la loro tensione indotta è ridotta ad una frazione nell'integratore. Evidentemente è necessario operare con un amplificatore ad alta amplificazione. Un'altra condizione necessaria è, come si è detto, che gli amplificatori siano strettamente aperiodici e senza distorsioni su una larga banda di frequenza.

5. — *Deduzione dei valori delle correnti dei fulmini dalle curve di variazione del campo magnetico.* — Le curve di variazione della corrente possono essere calcolate mediante le curve di variazione, registrate e calcolate, del campo magnetico: cioè le curve  $H$ . Non esiste alcun metodo esatto ed è allora necessario ricorrere ad un metodo di calcolo approssimato: un modo è quello di supporre che la corrente lungo il canale abbia in ogni istante il medesimo valore in tutti i punti. Questo implica che la corrente si sviluppi simultaneamente per tutta la lunghezza del canale. Da un punto di vista puramente fisico

questa approssimazione non è corretta: essa è tuttavia necessaria per semplificare i calcoli e porta d'altra parte a risultati che concordano in maniera sorprendente con quelli che si ottengono tenendo conto, nel modo più approssimato possibile, delle reali condizioni fisiche del fenomeno.

La misura va fatta ad una distanza sufficientemente breve dal canale di scarica, in modo che si possa trascurare l'influenza del campo

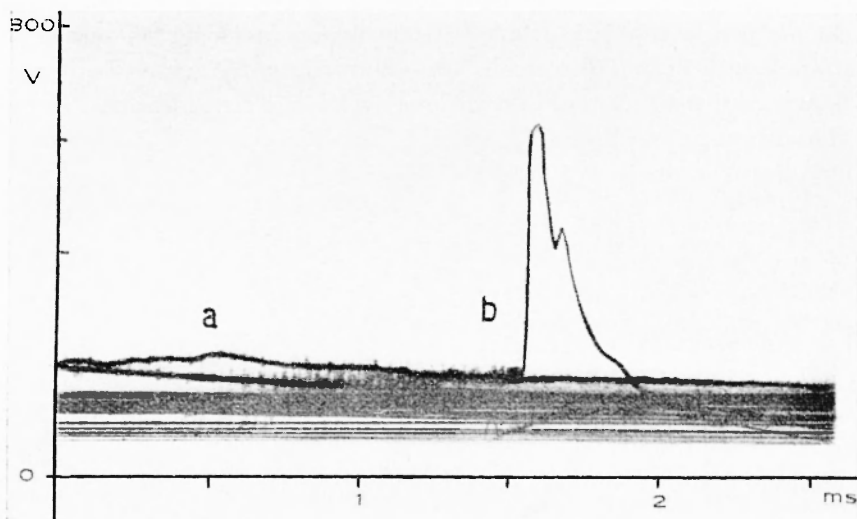


Fig. 14

di radiazione. Una discussione minuziosa di questi problemi è data in una relazione originale <sup>(26)</sup> in cui si fa un'applicazione delle equazioni di Maxwell con riguardo ai metodi di calcolo dei valori della corrente dedotti dalla variazione del campo magnetico.

I valori massimi della corrente dei fulmini misurati con il metodo delle barrette magnetiche variano entro ampi limiti, da poche migliaia di ampere sino a un centinaio ed, in pochi casi estremi, a due centinaia di migliaia di ampere. Questi valori estremi sono molto ben conosciuti. Quella che non è nota nella scarica di un fulmine è la variazione con il tempo della corrente. Sotto questo riguardo anche un metodo approssimativo avrà un valore notevole.

Possiamo trattare solo quei casi in cui il punto di osservazione è

a pochi chilometri di distanza dal canale del fulmine e quando questo è all'incirca verticale. Dobbiamo allora calcolare una scarica di fulmine tra la terra ed una nuvola. In questo caso con riferimento alla fig. 7, possiamo applicare il metodo delle immagini della corrente. Supponiamo che la corrente calcolata sia  $I$  (in kiloampere), la lunghezza del canale  $h$  e la distanza dal punto di osservazione  $r$ , ambedue espressi in chilometri, e che il campo magnetico sia  $H$  in  $10^{-3}$

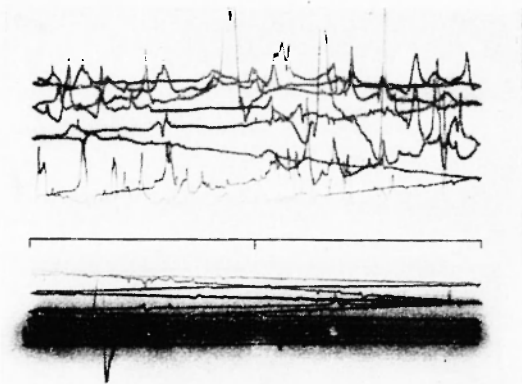


Fig. 15

Gauss. Entro i sopradetti limiti della distanza  $r$ , la corrente può essere calcolata mediante la relazione:

$$I = \frac{r \cdot H}{2} \sqrt{r^2 + h^2} \quad [12]$$

Il fattore 2 tien conto della riflessione sulla terra. A questo riguardo si deve supporre che la conduttività della terra abbia all'incirca gli stessi valori in tutte le direzioni intorno al punto colpito dalla scarica del fulmine. Se il quadro fosse situato su una regione di conduttività migliore delle zone circostanti, si otterrebbe un'influenza della riflessione maggiore della corrispondente influenza del canale dal fulmine. Sarà così della massima importanza effettuare le misure sopra una superficie di terreno aperto avente una conduttività omogenea in tutte le direzioni entro la distanza dei calcoli. In tal caso si ottiene un'equivalenza tra campo diretto e riflesso.

6. — *Requisiti generali del luogo dove si fanno le osservazioni.* —

Da ciò che è stato posto in rilievo nei precedenti capitoli segue che, la località delle osservazioni deve essere scelta con cautela per ottenere risultati che non siano influenzati da perturbazioni locali. Per es., non è raccomandabile intraprendere misure delle variazioni del campo elettromagnetico provocate da fulmini, in una regione monta-

gnosa e rocciosa. In tali località la conduttività della terra e le condizioni del campo esterno sono così perturbate che i valori non sono comparabili con i corrispondenti risultati di altre località. Evidentemente ciò deve valere anche per le osservazioni entro una città, ove case, cavi elettrici e condutture d'acqua rappresentano un sistema molto complicato nei riguardi delle conduttività della terra.

La misura delle variazioni del campo elettrico è anch'essa molto sensibile ai disturbi locali. In quanto precede è stato posto in rilievo che il metodo di  $dE/dt$  consente misure delle variazioni del campo



Fig. 16

elettrico anche in vicinanza di linee di conduzioni elettriche ad alta tensione. In tal caso, tuttavia, sarà sempre necessario integrare le curve. Pertanto è sempre preferibile scegliere una zona piana aperta libera di disturbi in modo da poter liberamente applicare il metodo  $E$  più conveniente e che non comporta alcun procedimento laborioso di integrazione. Per risolvere speciali problemi di ricerca, in una zona non disturbata, si possono usare con vantaggio, simultaneamente ambedue i metodi di  $E$  e di  $dE/dt$ . È anche possibile applicare nella stessa località la misura delle variazioni del campo magnetico dato che la simultanea osservazione delle variazioni del campo elettrico e magnetico ha a volte un altissimo valore.

Come illustrazione di una località adatta per una stazione da campo, nella fig. 8 è riprodotta una delle stazioni da campo dell'Istituto a circa 10 km da Uppsala.

7. — *Gli oscillografi a raggi catodici e i relativi metodi di registrazione.* — Quando si iniziarono in Svezia le misure delle variazioni del campo elettromagnetico, circa 30 anni fa, fu necessario costruire uno speciale oscillografo a raggi catodici atto a registrare scariche di fulmine e le sovratensioni da esse prodotte sulle linee di trasmissione

ad alta tensione. La registrazione in laboratorio dei fenomeni di scarica mediante l'oscillografo a raggi catodici è relativamente facile quando questo sia di costruzione perfetta e abbia buone qualità di funzionamento. Quando tutti i circuiti sono regolari, basta solo premere la mano su un dispositivo di sgancio e la registrazione è fatta.

Quando si devono registrare le variazioni del campo provocate da un fulmine e i relativi effetti di disturbo, non è possibile usare un qualsiasi dispositivo con azionamento a mano. L'istante in cui arriva la perturbazione prodotta

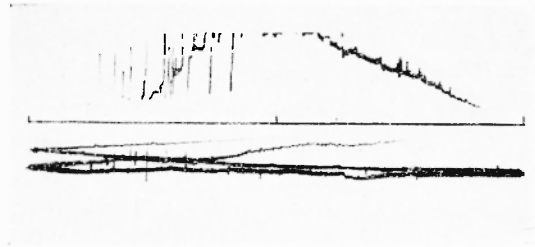


Fig. 17

dal fulmine è sempre affatto sconosciuto. La pellicola entro l'oscillografo dovrebbe subire lunghi periodi di attesa per essere impressionata solo per alcuni millesimi di secondo. I periodi di attesa delle scariche di fulmine possono prolungarsi per molti minuti ed intanto la pellicola sarebbe completamente annerita; questo anche se il tempo di attesa fosse molto breve.

Sino ad ora non esiste, se si eccettuano i dati raccolti in Svezia, un esteso materiale sulla struttura delle variazioni elettromagnetiche

delle scariche di fulmine. La ragione di tale stato di cose è da ricercarsi nel fatto che altri ricercatori non si sono sufficientemente sforzati di superare la peculiare proprietà delle scariche dei fulmini, consistente nel fatto che



Fig. 16

il tempo di arrivo di una scarica di fulmine non può essere noto in precedenza. Trenta anni fa non erano ancora noti dispositivi elettronici di bloccaggio del pennello catodico entro un oscillografo. In quest'epoca non esisteva alcuna tipo di tubo elettronico adatto a questo scopo. Fui pertanto costretto a costruire uno speciale

tipo di oscillografo a raggi catodici che ho descritto altra volta (18). Questo oscillografo, che è studiato specialmente per registrare le scariche di fulmini e le sovratensioni sulle linee elettriche, è provvisto di uno speciale dispositivo di bloccaggio. Il raggio catodico è mantenuto alla sua intensità normale, ma non può colpire la pellicola sensibile entro l'oscillografo finché una tensione prodotta su certe pacche non permette al fascetto di elettroni di penetrare nella parte registratrice dello strumento attraverso un diaframma (vedi fig. 9).

Il dispositivo impedisce inoltre ai raggi dispersi ed agli elettroni secondari di annerire la pellicola fotografica.

Quando non vi è tensione sulla coppia superiore delle placche di deviazione, il fascetto di elettroni che attraversa l'apertura anodica segue un percorso dritto lungo l'asse dello strumento. Esso è però arrestato da un piccolo schermo di materiale conduttore, lo scudetto di schermo. Il sistema di placche che si trova fra lo scudetto di schermo e il diaframma è metallicamente connesso alle placche superiori mediante un collegamento incrociato.

Tutto l'insieme è dimensionato in modo tale che quando si applica una tensione alle placche superiori il raggio principale, dopo aver subito una deviazione nel passaggio fra le placche suddette, viene, per effetto della coppia inferiore, incurvato in senso opposto e diretto attraverso il foro del diaframma.

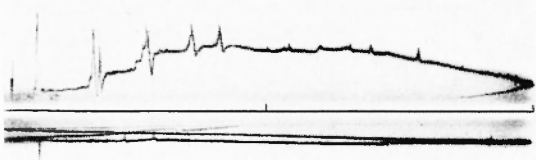


Fig. 19

Le registrazioni che si ottengono sulla pellicola posta nell'interno dell'oscillografo, hanno una tipica ombra, la « banda di zero », causata dalla presenza dello scudetto di schermo entro l'oscillografo. Questa « banda di zero » rappresenta evidentemente un inconveniente che è il prezzo che si deve pagare per evitare una serie di complicati relais a valvole elettroniche per la deviazione iniziale del raggio elettronico.

In generale è raccomandabile, quando si registrano le scariche dei fulmini di operare con due oscillografi a raggi catodici simultaneamente. Questa necessità proviene dal fatto che la forma di variazione dei fenomeni prodotti dalle scariche dei fulmini è molto complicata.

non solo, ma i valori dell'intensità del campo sono assai diversi durante le varie fasi del fenomeno. Solo usando simultaneamente due oscillografi a raggi catodici aventi diversa sensibilità nei riguardi del tempo e delle ampiezze è possibile ottenere un'analisi completa del fenomeno.

Per es., nel registrare le variazioni del campo magnetico in una stazione da campo, sono stati tenuti in funzione simultaneamente almeno tre oscillografi a raggi catodici. I tre strumenti sono stati collegati allo stesso amplificatore ed aereo a quadro. Uno di essi operava con un asse dei tempi a movimento lento e gli altri due con un asse più rapido. Le registrazioni venivano effettuate simultaneamente con due oscillografi, uno

dei quali era a movimento lento. Il terzo strumento veniva usato per osservazioni visuali dirette degli impulsi. Questo strumento controllava le condizioni dell'esposizione e consentiva, dopo l'esposizione, l'avanzamento di nuova pellicola in uno dei

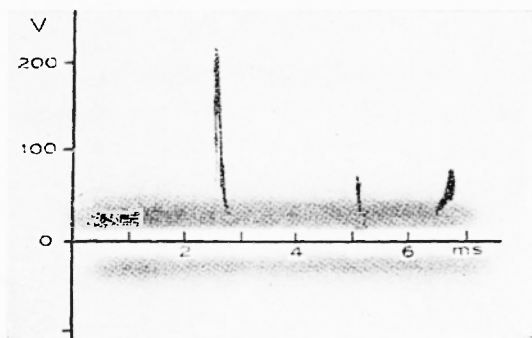


Fig. 20

due oscillografi usati per registrare al momento conveniente. In certe occasioni quando si dovevano eseguire speciali studi, si facevano funzionare due oscillografi addizionali collegati ad amplificatori e ad aerei a quadro separati.

Entro gli oscillografi era necessaria una riserva di carta fotografica o pellicola su rulli di una larghezza di 7-8 cm ed una lunghezza di 20 m. Per ottenere entro l'oscillografo un vuoto per un raggio catodico efficiente ed indisturbato, erano necessari dispositivi di evacuazione molto efficaci. Fui perciò costretto a costruire una speciale pompa molecolare. La proprietà caratteristica di questa pompa, per esempio a confronto con la ben nota pompa Hollweck, è che il rotore della pompa è conico. La costruzione, la regolazione e le eventuali riparazioni della pompa risultano così molto facilitate. Uno schema della sezione della pompa è dato dalla fig. 10 ed una foto nella fig. 11. Il rotore funziona con una velocità di 3000 giri minuto ed è azionato da uno statore trifase esterno. Il rotore è posto entro un cilindro di

metallo « monel ». Per il vuoto preliminare veniva usata una pompa di tipo comune fabbricata nell'Istituto.

Nella fig. 12 è riprodotta una foto dell'oscillografo ed in fig. 13 una veduta interna di due oscillografi a raggi catodici montati in una stazione mobile da campo.

La speciale costruzione sopra descritta di un oscillografo a raggi catodici ha subito solo insignificanti modifiche, da quando, fu usato nel 1925, da quando cioè si effettuarono in Svezia le prime registrazioni delle sovratensioni provocate da fulmini sulle linee di trasmissione ad alta tensione. Questo tipo di oscillografo è stato adottato (3 anni più tardi) per registrazioni analoghe in laboratori da campo della Westinghouse Electric and Manufacturing Company negli U.S.A.

8. — *Il circuito per l'asse dei tempi.* — Nella prima applicazione

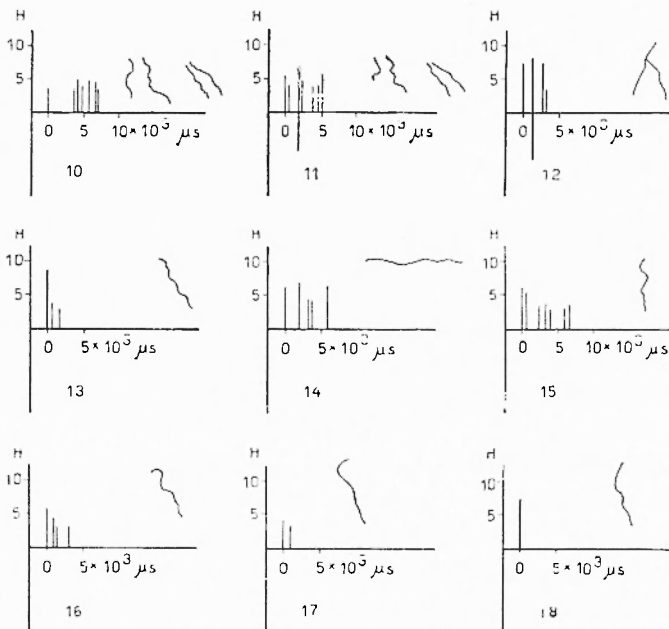


Fig. 21

degli oscillografi a raggi catodici in cui le registrazioni furono effettuate su una pellicola a carta fotografica fissa si usò un'asse dei tempi con variazione sinusoidale.

Questo tipo di asse dei tempi ha l'inconveniente di presentare

un raccorcimento della scala troppo accentuato in prossimità dei punti di inversione. Si è reso così ben presto necessario fornire gli oscillografi di un dispositivo per l'asse dei tempi capace di dare una variazione della tensione dei tempi lineare nei due versi. È di grande importanza l'avere un dispositivo capace di dare variazioni di ambedue le direzioni, quando si ha a che fare con variazioni di tipo ad impulso. In tal caso la completa variazione verrà facilmente riprodotta anche se la durata dovesse essere maggiore della escursione sull'asse dei tempi. Nel caso di forme di variazioni complicate sarà sempre molto utile operare simultaneamente con due oscillografi a raggi catodici. Uno dovrebbe registrare con asse dei tempi rapido e l'altro con un asse dei tempi lento. Risulta poi facile combinare le registrazioni per ottenere le curve di variazione.

L'ordinaria lunghezza di spostamento sull'asse dei tempi era di 6 cm. Il vantaggio dell'oscillografo aperto era che lo strumento consentiva, introducendo una piccola modifica nella costruzione, l'applicazione di un lungo asse dei tempi di 21 cm. Questa registrazione poteva essere condotta con un asse dei tempi lineare e consentiva, come sarà illustrato dagli esempi seguenti, anche un'analisi delle variazioni complicate che duravano per un periodo molto lungo.

9. — *Esempi tipici di oscillogrammi registrati.* — I seguenti tipi di oscillogrammi registrati illustrano l'applicabilità dell'oscillografo nella registrazione delle variazioni del campo elettromagnetico provocate da fulmini.

Nella fig. 14 è riprodotta una registrazione di una scarica di fulmine presa con antenna aperta. Le prescariche tipiche prevalgono durante due millisecondi, tra *a* e *b*, prima che cominci a comparire una singola scarica principale con il suo fronte ripido in *b*.

Nella fig. 15 vengono illustrate alcune registrazioni, prese ad una delle stazioni campali dell'Istituto durante la stagione temporalesca del 1948. Gli oscillogrammi mostrano le difficoltà che sorgono per l'operatore durante le registrazioni. La deviazione dal raggio catodico nell'oscillogramma di sinistra ha superato i limiti di registrazione. L'osservatore non ha potuto stimare in anticipo

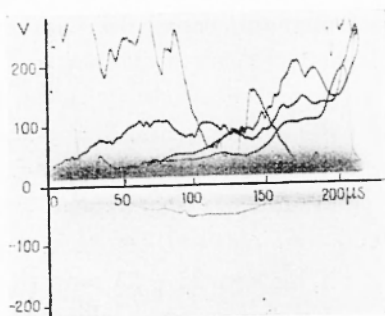


Fig. 22

Fampiezza della scarica. Questo mostra come è necessario che l'operatore abbia diretta esperienza delle osservazioni delle ampiezze che si ottengono con uno oscillografo collegato in parallelo ad una antenna. Solo in questo modo egli potrà regolare ad un valore adatto la semplificazione per ogni fulmine. Un esempio, a cui l'operatore è riuscito a regolare bene l'ampiezza, è dato dalla fig. 16.

Nella fig. 17 vengono riprodotti esempi relativi all'asse dei tempi di tipo lungo, ivi un oscillogramma, molto interessante, ha oltrepassato il limite di registrazione, e ciò ovviamente impedisce un'analisi completa di tutti i particolari. Di speciale interesse è la sovrapposizione di variazioni rapide in alcuni tratti della scarica. Non siamo ancora in grado di dare una spiegazione di queste variazioni rapide. Senza dubbio sarà necessario registrarle simultaneamente in due stazioni non troppo distanti fra loro, per osservare se esse sono o non di origine

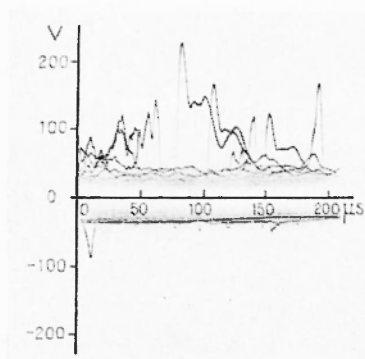


Fig. 23

assolutamente locale nella nube temporalesca. Una registrazione in cui sono preponderanti queste variazioni rapide è riprodotta nella figura 18. Nella figura 19 è riprodotto un tipo di oscillogrammi che a volte si ripetono uno dietro l'altro.

Se l'aereo a quadro serve per registrare le variazioni di campo magnetico, l'asse dei tempi può essere di tipo lento. I fronti ripidi delle variazioni saranno in tali casi linee verticali con una caratteristica discesa più lenta. Ciò è illustrato in fig. 20. Se nello stesso tempo si osservano i canali dei fulmini, possiamo mettere in relazione le variazioni nel campo magnetico  $H$  con le direzioni del canale del fulmine, come è illustrato nella fig. 21. In Svezia la luce durante le notti estive mi ha impedito di registrare i canali dei fulmini con un sistema fotografico a tamburo ruotante, simultaneamente ad una ripresa oscillografica. E' da sperare che tali indagini siano possibili in Italia con temporali notturni.

Nelle figg. 22 e 23 sono riprodotti alcuni oscillogrammi tipici originali con il sistema dell'aereo a quadro. Simultaneamente sono stati presi oscillogrammi con un asse dei tempi a movimento lento, che

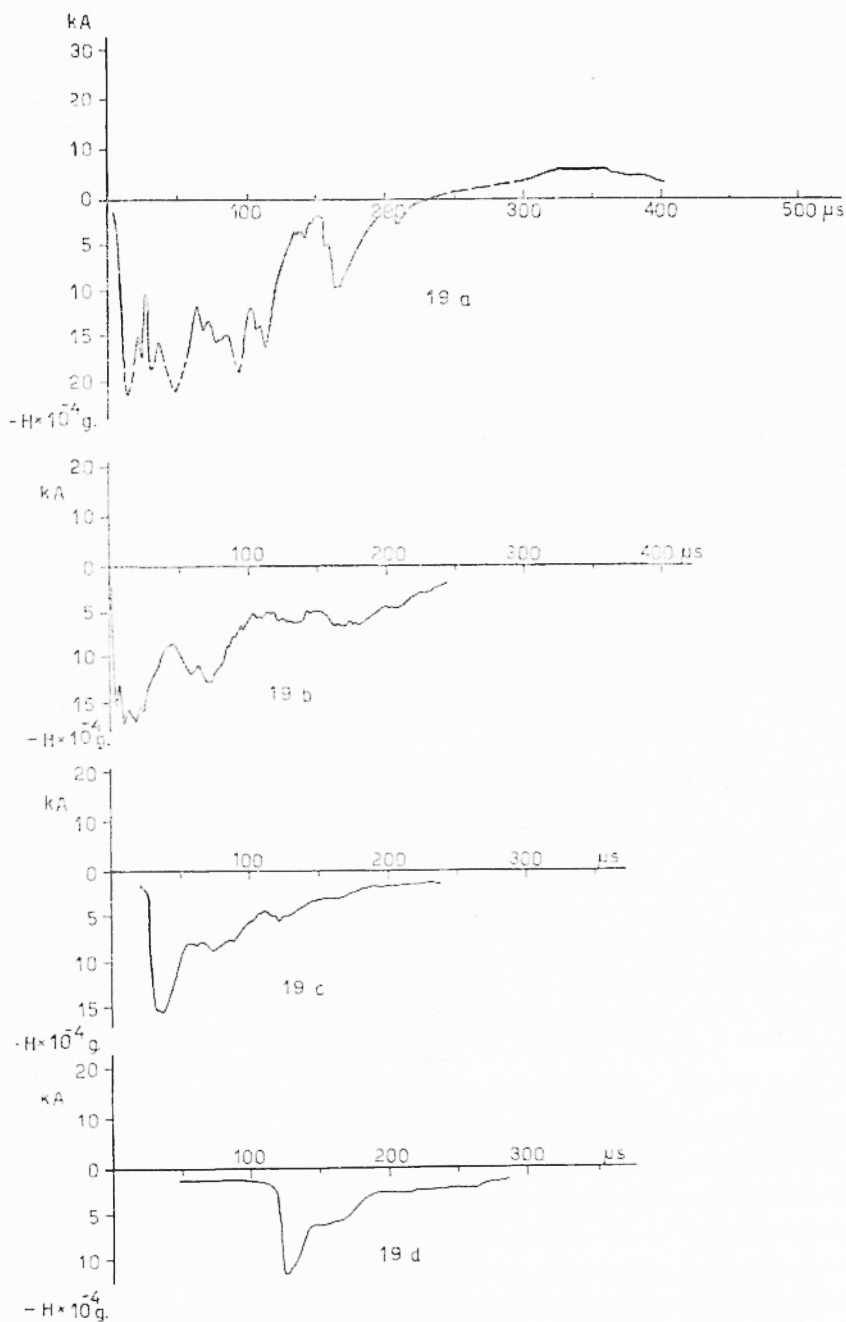


Fig. 24

consentiva registrazioni su una scala dei tempi continua. Nella fig. 24 è illustrato come questo metodo può essere applicato ad una scarica di fulmine consistente in quattro scariche successive nello stesso percorso. Le prime scariche del percorso hanno variazioni con caratteristici fronti ripidi maggiori delle successive, le cui condizioni frontali debbono essere state influenzate da una certa ionizzazione residua lungo il canale.

Nella fig. 25 viene riprodotto un esempio molto raro e nello stesso tempo in condizioni particolarmente favorevoli per la registrazione. Gli oscillogrammi rappresentano la variazione del campo magnetico

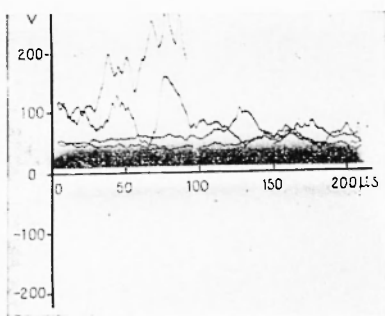


Fig. 25

in corrispondenza di un tragitto verticale di un fulmine diretto verso terra su terreno piano aperto a una distanza di 4,5 km dalla stazione oscillografica dell'Istituto, distanza che era molto opportuna per i calcoli.

Questa scarica di fulmine ha avuto una conseguenza tragica. Nel campo aperto, erboso, v'era un agricoltore che stava su un carro di fieno e parlava con il suo garzone che era sotto di lui, sul terreno.

L'agricoltore fu colpito dal fulmine, i suoi abiti e il fieno caricato sul carro presero fuoco. Egli cadde giù dal carro, per terra. Il garzone svenne. Alcune persone corse sul posto cercarono di soccorrere l'agricoltore, il cui corpo mostrava gravi bruciature, ma invano. Il suo orologio si era fermato e sia l'orologio che la catena mostravano tracce molto tipiche di fusione. Il comportamento del cavallo attaccato al carro fu molto strano. Il cavallo, che era caduto sui ginocchi al momento del fulmine, fu staccato dalle stanghe e si rialzò da sé dopo un forte nitrito; camminò per qualche passo e cominciò a mangiare, ma dopo un po' cadde morto.

Il fulmine cadde a terra su un campo aperto, ove l'agricoltore, con il suo carro di fieno, era l'oggetto più alto in uno spazio di almeno 300 metri.

Il terreno nel punto colpito era molto omogeneo e consisteva di un sottile strato di terra coltivata su uno strato più profondo d'argilla. L'addensamento del campo, provocato dall'uomo e dal carro, hanno

provocato la caduta del fulmine proprio nel punto ove si trovava l'uomo.

Dalla seguente fig. 26 si può trarre che detto fulmine consisteva di due scariche nello stesso percorso con una differenza di tempo di 9,5 millisecondi. I corrispondenti valori di variazione di corrente successivamente calcolati sono riprodotti nella fig. 26. È visibile una pronunciata differenza nelle ampiezze e nella struttura delle due scariche di corrente nel canale del fulmine. L'impulso di corrente con la durata più lunga di 800  $\mu$  sec. ha raggiunto un valore massimo di

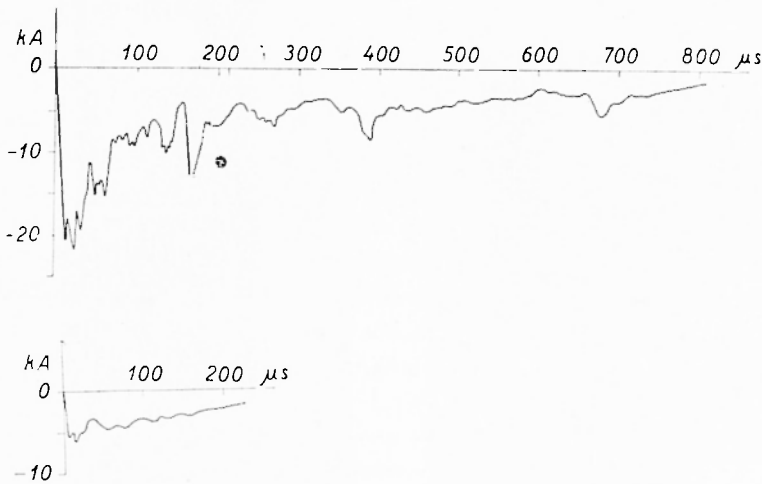


Fig. 26

22,5 kiloampere. Non vi è dubbio che proprio la lunga durata di questa corrente ha causato l'incendio del carro di fieno. Il fatto che è stato possibile registrare l'oscillogramma di uno scoppio di fulmine, che ha ucciso e bruciato, è senza dubbio da considerare come un caso eccezionalmente raro.

I vantaggi dell'oscillografo a raggi catodici aperto sono notevoli per diversi aspetti. Lo strumento ha una velocità di registrazione molto buona e possibilità di differenti applicazioni. L'inconveniente derivante dal fatto che l'oscillografo richiede del tempo per essere vuotato è assolutamente trascurabile. La possibilità di avere un maggior quantitativo di pellicola o carta fotografica entro il descritto oscillografo nel vuoto è stata risolta molto bene. Gli oscillografi dell'ultimo modello permettono di avere una riserva di carta fotografica entro il

tubo a vuoto dello strumento, tanto abbondante che l'oscillografo può funzionare per circa 20 ore, ad esempio, registrando scariche di fulmine, senza che si debba aprire di continuo per rifornirlo di carta sensibile. Alternando due oscillografi sarà possibile lavorare con assoluta continuità.

Evidentemente detti apparecchi hanno degli svantaggi. Essi sono

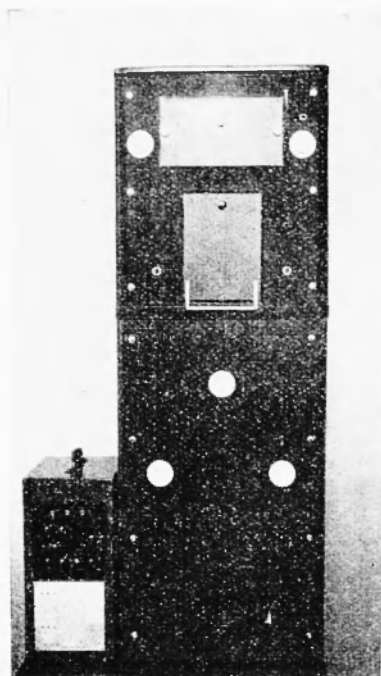


Fig. 27

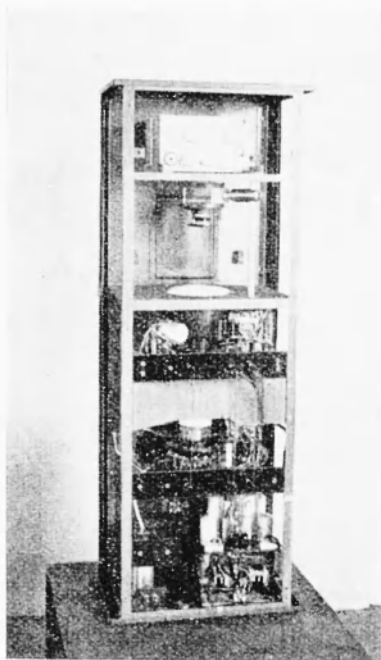


Fig. 28

pesanti e richiedono uno spazio piuttosto grande in una stazione da campo. La registrazione con l'oscillografo richiede due operatori, uno dei quali deve regolare la valvola del vuoto per stabilire il vuoto di emissione del catodo e per regolare la corrente anodica. L'altro operatore deve regolare la pellicola dopo l'esposizione. Senza dubbio questi processi possono essere eseguiti in modo automatico; il problema costruttivo di una tal disposizione è già stato risolto e provato. Ma una automatizzazione completa dell'oscillografo non è possibile. Questa richiede un oscillografo del tipo chiuso descritto nel capitolo seguente.

10. — *Gli oscillografi a raggi catodici con tubi chiusi, impiegati nelle ricerche sui fenomeni di scarica dei fulmini.* — L'oscillografo a raggi catodici a tubo sigillato ha avuto un enorme sviluppo negli ultimi 15 anni. Tubi speciali sono stati realizzati per il radar, durante la passata guerra, per la televisione e per diversi importanti scopi di misura. Da non molto tempo ci siamo dovuti occupare dell'impiego di tali tubi a raggi catodici anche per ricerche su scariche di fulmini. Sia in Inghilterra che in Francia questo tipo di tubo a raggi catodici è stato usato per ricerche sugli atmosferici. La mia principale obiezione, fatta nei primi tempi, sui tubi riguardava la loro scarsa luminosità per la registrazione. Durante il loro primo periodo di sviluppo è avvenuto che i tubi a raggi catodici avevano una intensità luminosa tanto bassa che era impossibile effettuare una qualsiasi registrazione di fenomeni malgrado il fatto che essi durassero per migliaia di microsecondi. L'unico modo di ottenere la loro variazione era di osservarli ad occhio e poi disegnarli seguendo la memoria visiva.

Non era affatto possibile osservare variazioni brevi della durata compresa tra pochi microsecondi sino ad alcune centinaia di microsecondi.

Un'altra difficoltà nell'impiego dei tubi chiusi consisteva nella realizzazione del relais elettronico di sgancio poiché non era possibile, ottenere lo sgancio senza ritardo. Le prescariche venivano così perdute e i fenomeni di scarica dei fulmini si dovevano registrare senza le prescariche. Le registrazioni in tali condizioni, cominciavano così con la scarica principale di un fulmine.

Con l'intenso sviluppo dei tubi a raggi catodici chiusi, subito prima e durante la seconda guerra mondiale, la situazione è notevolmente cambiata e migliorata. La ragione di questo mutamento nelle

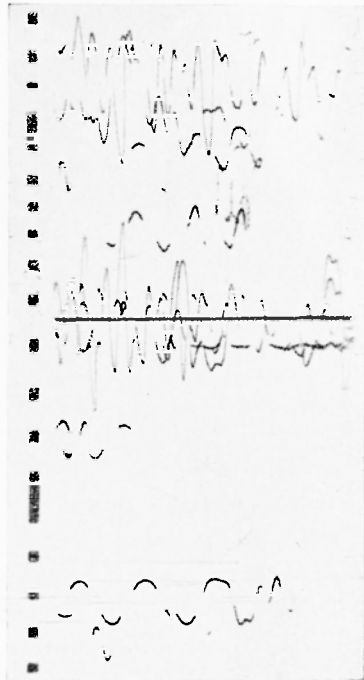


Fig. 29

possibilità dei tubi chiusi come si è detto, è dovuta al loro rapido perfezionamento per l'applicazione al radar, alla televisione e ad altri importanti dispositivi di misura, che hanno completamente cambiato la situazione. Quindi i moderni tubi a raggi catodici chiusi hanno pro-

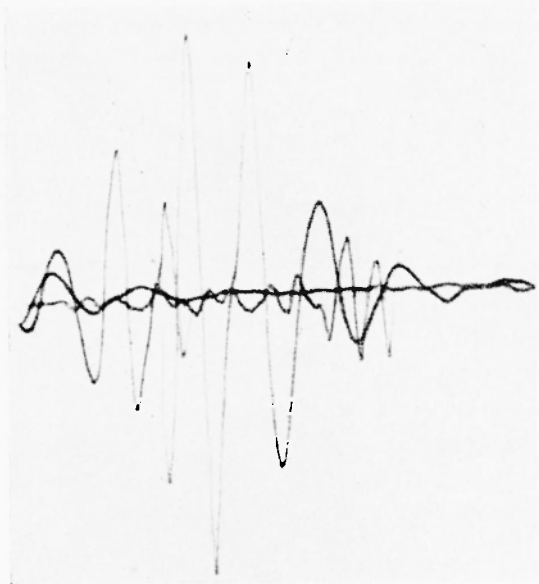


Fig. 30

così minuto come è possibile con gli oscillografi aperti. Avuto riguardo a questi fatti gli oscillografi aperti, tenuto conto di questa possibilità, saranno sempre necessari ogni qual volta si richiede una analisi dettagliata dei fenomeni.

Il vantaggio più importante dei tubi a raggi catodici è il loro piccolo peso e la loro qualità di facile funzionamento.

11. — *Gli speciali oscillografi a raggi catodici chiusi, costruiti presso l'Istituto.* — Nell'Istituto durante gli scorsi anni dopo la seconda guerra mondiale, sono stati costruiti oscillografi a raggi catodici del tipo chiuso. Si è cominciato con l'usarli principalmente come strumenti addizionali per l'osservazione diretta ad occhio, in combinazione con gli oscillografi aperti. Un esame più accurato delle loro qualità ha consentito di applicare gli strumenti per la registrazione. Gli oscillografi furono provvisti di una camera oscura per la pellicola e di un sistema di lenti, che risultarono avere proprietà fotografiche

proprietà molto buone nei riguardi sia della necessaria intensità luminosa occorrente per la registrazione che delle soddisfacenti qualità di manipolazione. Nelle ricerche sui fenomeni di scarica dei fulmini i moderni tubi a raggi catodici chiusi possono completare in un certo grado l'impiego degli oscillografi a raggi catodici aperti. Evidentemente i tubi chiusi non presentano le possibilità di registrazione dei fenomeni di scarica in modo

molto buone anche nel caso di fenomeni rapidi con una durata di microsecondi. Il tubo a raggi catodici usato negli strumenti di nuova costruzione è stato sinora del tipo E 4054/E/16 fabbricato dalla General Electric Company di Londra. Nella fig. 27 viene riprodotta una veduta esterna degli oscillografi e nella fig. 28 è rappresentata una veduta interna degli stessi. La camera è piazzata nella parte superiore dello strumento ed il tubo

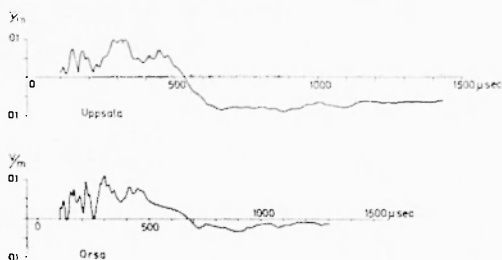


Fig. 31

a raggi catodici con i suoi circuiti a valvole elettroniche è piazzato nella parte inferiore. Il peso totale dell'apparato è di circa 50 kg. Aprendo lo sportello *A* della fig. 27 è possibile osservare direttamente le deviazioni del punto luminoso sullo schermo fluorescente dell'oscillografo mentre si effettua la registrazione. L'unica condizione da soddisfare è che l'operatore è costretto a lavorare in un ambiente leggermente oscurato. La possibilità della osservazione diretta degli oscillogrammi è molto vantaggiosa tanto più che permette all'operatore di regolare la amplificazione e quindi l'ampiezza delle registrazioni da un istante ad un altro.

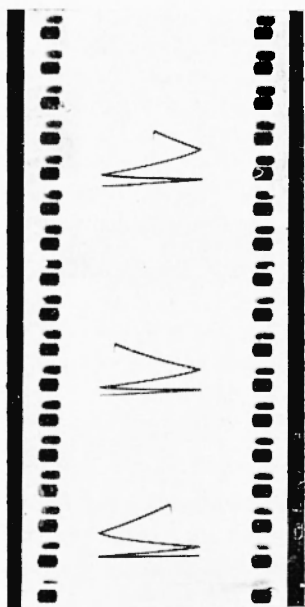


Fig. 32

12. — *Esempi tipici di oscillogrammi registrati.* — Gli oscillografi a raggi catodici del modello chiuso sono stati usati specialmente in indagini simultanee di scariche di fulmini ed atmosferici in due stazioni situate a distanze notevoli tra loro. In tal caso gli oscillografi sono stati provvisti di un motore elettrico che fa scorrere continuamente la pellicola. È importante provvedere i due oscillografi di un sistema simultaneo di marcatura del tempo. Gli oscillografi debbono registrare gli stessi atmosferici in stazioni situate, ad esempio, a distanze di diverse centinaia di chilometri. Ciò è stato realizzato con

L'applicazione di un sistema di registrazione del tempo prodotto con dispositivi cronometrici azionati dal sistema sincronizzato svedese di trasmissione di energia elettrica. Un esempio tipico di registrazione con un tale marcatempo è riprodotto nella fig. 29.

Nella fig. 30 viene riprodotto un esempio di una originale registrazione, con il metodo di  $E$ , degli atmosferici prodotti a distanza di circa 150 km dalla stazione oscillografica entro una nube temporalesca di neve del tipo Cumulo-Nembo.



Fig. 33

Nella fig. 31 vengono riprodotti esempi di atmosferici registrati con il metodo di  $E$  da due stazioni alla distanza di 300 km. Gli oscillogrammi sono stati dedotti da registrazioni nelle quali si usava il metodo di registrazione simultanea.

Nelle figg. 32 e 33 sono riprodotti esempi della sensibilità temporale che si ha con l'oscillografo a raggi catodici chiuso. Il tempo di escursione è di 40  $\mu$  sec., e nella fig. 33 è chiaramente visibile il fronte di 1  $\mu$  sec. Se è necessario un sistema di registrazione più rapido, sarà abbastanza facile cambiare il tubo a raggi catodici con una tensione di accelerazione di 4000 volt con un altro tubo avente una tensione acceleratrice maggiore.

*Comunicazione inviata dal Centro Italo-Svedese di Elettrofisica dell'Istituto per le ricerche sulle alte tensioni della Università di Uppsala.*

#### RIASSUNTO

*Si dà una descrizione dei principi relativi ai metodi di misura impiegati nello studio delle variazioni del campo elettromagnetico nel caso di scariche di fulmini e degli effetti da esse prodotti sotto forma di atmosferici. Si dà pure un ragguglio sulle proprietà e sui requisiti degli oscillografi a raggi catodici che si richiedono per questo genere di ricerche.*

*Presso l'Istituto di ricerche sulle alte tensioni, della Università*

di Uppsala sono stati costruiti due tipi di oscillografi a raggi catodici. In un tipo il raggio elettronico colpisce direttamente lo strato fotografico nel vuoto; per l'altro tipo di costruzione si usano tubi chiusi e le fotografie sono riprese con una camera disposta all'esterno del tubo oscillografico. Vengono dati esempi di registrazioni fotografiche ottenute in condizioni differenti.

#### BIBLIOGRAFIA

- (1) PÖCKLES F.: *Ein Versuch, die bei Blitzschlägen erreichte maximale Stromstärke zu schätzen*, Meteorol. Zeitschrift 15, 41, Berlin 1898. - *Über die bei Blitzschlägen erreichte Stromstärke*, Phys. Zeitschrift 2, 306, Berlin 1901.
- (2) HUMPHREYS W. J.: *Physics of the Air*, - Journal of the Franklin Inst. v. 182, 2, August, p. 225, Philadelphia 1913.
- (3) NORINDER H. - KARSTEN O.: *Experimental investigations of resistance and power within artificial lightning current paths*, - Arkiv för matematik, astronomi och fysik, 35 A, nr 16, Stockholm 1919.
- (4) GUNN R.: *Regular contributed original research - Electric field intensity inside of natural clouds*, - Journal of Applied Physics, 19, 5, 481, New York 1948.
- (5) THOMSON W.: *Reprint of papers on electrostatics and magnetism* - London 1872.
- (6) LEJAY P.: *Les perturbations orageuses du champ électrique et leur propagation à grande distance* - Inaugural diss., Paris 1926.
- (7) MAURAIN C.: *La foudre* - Collection Armand Colin, Paris 1948.
- (8) NORINDER H.: *The relation between lightning discharges and atmospherics in radio receiving* - Journal of the Franklin Inst. 221.5, Philadelphia 1936.
- (9) NORINDER H.: *Electric thunderstorm field researches* - Electrical World 83, 5, p. 223, New York 1924. - *En experimentell undersökning rörande blixstens urladdningsform*, (An experimental investigation of discharge variations of lightning.) Teknisk Tidskrift, 55, s. 139-141, Stockholm 1925. - *The cathode ray oscillograph as used in the study of lightning and other surges on transmission lines* - Trans. Amer. Inst. of Electr. Eng., 47, p. 116-156, New York 1928. - *On the nature of lightning discharges*, - Journal of the Franklin Inst., 213, 6, Philadelphia 1934.
- (10) WATT R. A. W. - APPLETON E. V.: *On the nature of atmospherics* - Proc. Roy. Soc. Ser. A, 103, 720, London 1923.
- (11) NORINDER H. - NORDELL R.: *Vergleichende Untersuchungen von Rundfunkstörungen von längerer und kürzerer Dauer* - Elektrische Nachrichten-Technik, 12, 10, Berlin 1935.
- (12) APPLETON E. V. - CHAPMAN T. W.: *The nature of atmospherics II* - Proc. Roy. Soc. Ser. A, 153, 1, London 1937.
- (13) WILSON C. T. R.: *Some determinations of the sign and magnitude of electric discharges in lightning flashes* - Proc. Roy. Soc. Ser. A, 92, 555, London 1916.
- (14) NORINDER H.: *Lightning currents and their variations* - Journal of the Franklin Inst., 220, 1, Philadelphia 1935.

(15) NORINDER H.: *Rapid variations in the magnetic field produced by lightning discharges* - Proc. Phys. Soc. London, 49, 364, London 1937.

(16) NORINDER H. - DAHLE O.: *Measurements by frame aerials of current variations in lightning discharges* - Kungl. Vetenskapsakademien. Arkiv för matematik, astronomi och fysik, 32 A, nr 5, Stockholm 1945.

(17) NORINDER H.: *Some aspects and recent results of electro-magnetic effects of thunderstorms* - Journal of the Franklin Inst. 244, 2, 3, Philadelphia 1947.

(18) ACKERMANN O.: *A cathode ray oscillograph with Norinder relay. Its design and application* - Trans. Amer. Inst. of Electr. Eng. 49, p. 467-475, New York 1930.