Elettricitá atmosferica

1 Introduzione

Tratteró in questa lezione dei fenomeni elettrici che si producono nell'atmosfera. I quali m'é parso meglio di esaminare in sé, essendoché questa classe di fenomeni non puó, nello stato attuale della Scienza, collocarsi convenientemente in alcuna delle parti in cui abbiamo diviso il Trattato dell'Elettricitá;...Peltier cerca di stabilire che la Terra agisce costantemente come un corpo potentemente elettrizzato negativamente, e lo spazio celeste come elettrizzato positivamente, e che perció sono elettrizzati per influenza tutti i corpi interposti.

Il brano che abbiamo riportato é tratto dal capitolo LXVI delle "Lezioni di Fisica", tenute da Carlo Matteucci presso l'Universitá di Pisa attorno al 1840. Come si vede, il problema dell'elettricitá atmosferica ha interessato i Fisici per quasi due secoli. Va subito detto che, nonostante i molti sforzi fatti, il problema non é ancora del tutto compreso e che ingenti sforzi sperimentali sono tuttora in corso in molti paesi. Il problema ha anche un notevole interesse medico, poiché é stato accertato che le variazioni nel campo elettrico atmosferico hanno effetti importanti sull'organismo. [1] É quindi istruttivo studiare il problema, esaminare i progressi effettuati, i metodi di misura adoperati ed i meccanismi che sono stati proposti per spiegare i fenomeni osservati.

In una giornata di bel tempo, in pianura o sulla superficie del mare, esiste un campo elettrico rivolto verso il basso, di circa 100 V/m. Il segno corrisponde ad una carica negativa distribuita uniformemente sulla superficie della Terra. Ció implica che, nell'aria, il potenziale al livello della nostra testa é circa 200 Volt piú alto di quello al livello dei piedi. Il motivo per cui non ce ne rendiamo conto é nel fatto che il nostro corpo é un buon conduttore e quindi assume un potenziale uniforme. In prossimitá della superfice del nostro corpo le superfici equipotenziali, normalmente orizzontali, si deformano in modo tale che la superficie del corpo risulti tutta al medesimo potenziale. Analoga considerazione puó esser fatta per la piú gran parte degli oggetti che ci circondano: alberi, animali, automobili etc.

Misure accurate del campo elettrico terrestre sono state effettuate per molti anni, a varie altezze ed in diversi punti della Terra. Si é trovato che:

1. in condizioni di bel tempo ed al livello del mare il valore del campo elettrico misurato non dipende dalla posizione geografica

2. il campo elettrico, sempre rivolto verso il basso, diminuisce molto rapidamente con l'altezza

3. in un generico punto della Terra, il campo cambia nel corso della giornata ed é massimo verso le ore 18-19 (ora di Greenwich o tempo universale U.T.)

4. il valore assoluto del campo elettrico, pur conservando la medesima modulazione giornaliera, é piú alto in Estate che d'Inverno.

Misure sono state effettuate, oltre che del campo elettrico, della conducibilitá dell'atmosfera, in vari punti della Terra ed a varie altezze. Si trova che questa ha un andamento temporale

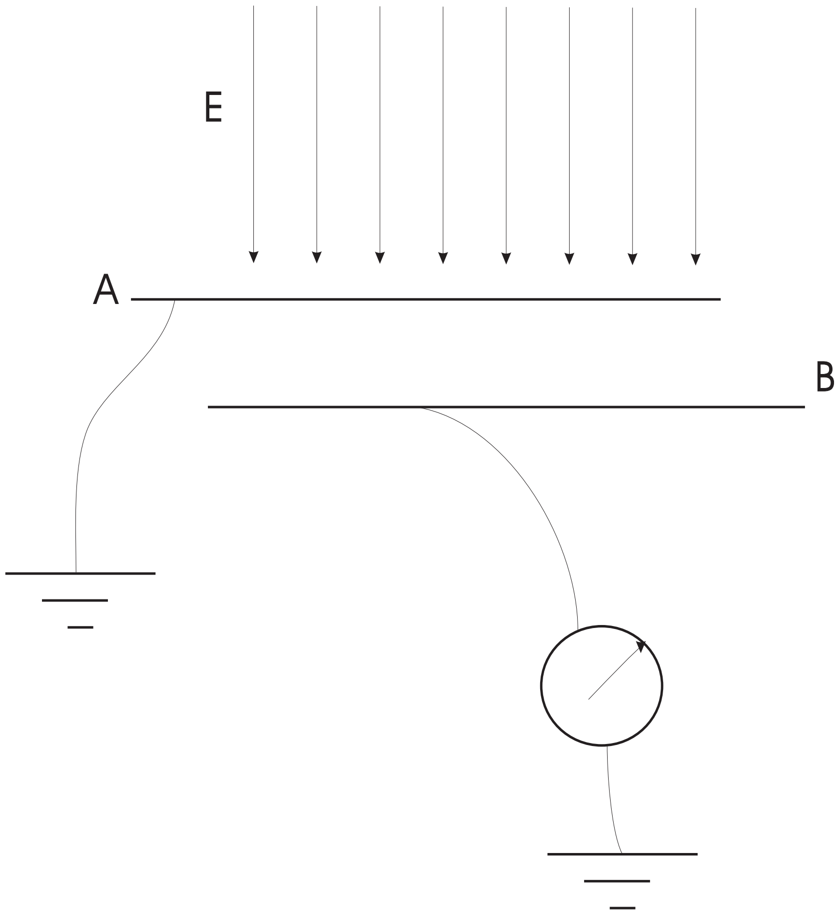

Figure 1:

ed una dipendenza dall'altezza strettamente legati alle analoghe dipendenze riscontrate per il campo elettrico.

La presenza di una conducibilitá finita σ dell'atmosfera e l'equazione:

$$J \;=\; \sigma\, E$$

ci dice che esiste, in condizioni di tempo sereno, una corrente, rivolta verso il basso, proporzionale al campo stesso. Poiché J non puó dipendere dall'altezza ne segue che:

$$\sigma \;\propto\; \frac{1}{E}$$

e che quindi, quando σ é massima il campo elettrico é minimo. Ció é in effetti quel che si osserva.

2 Misura del campo elettrico terrestre

La misura del campo elettrico terrestre é spesso effettuata utilizzando uno strumento concettualmente molto semplice.

Nella figura 1 la piastra inferiore (B), in assenza della piastra superiore(A) acquisterá, per effetto del campo $\vec{E}$ ad essa perpendicolare, una densitá di carica superficiale:

$$\sigma \;=\; \epsilon_0\, E$$

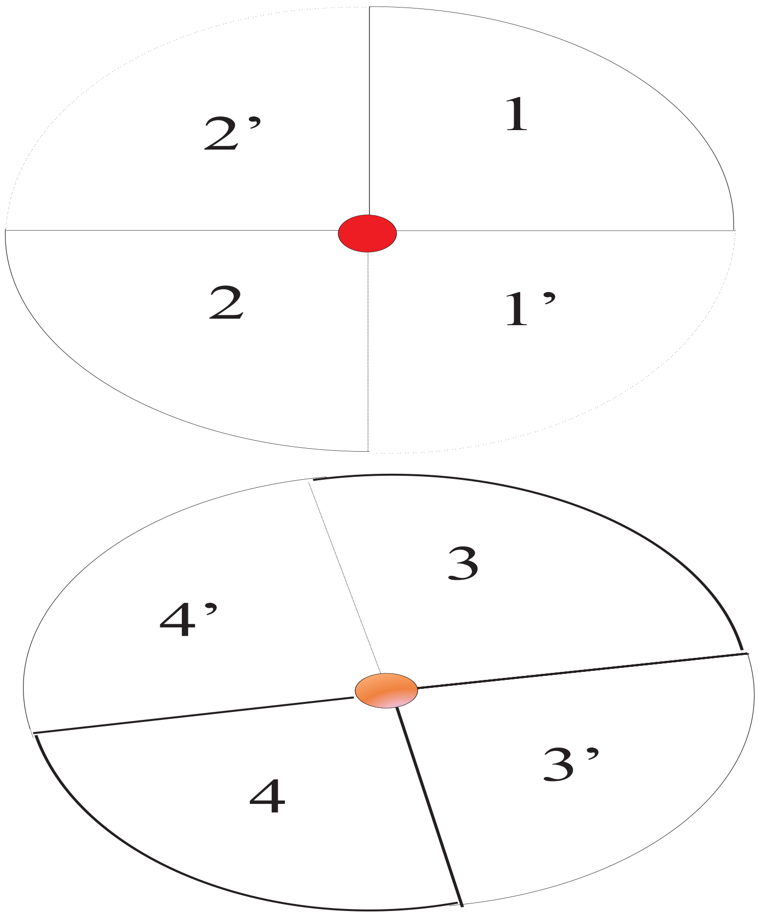

Figure 2:

Se ora noi inseriamo la piastra (A), una carica sará indotta su questa dal campo, mentre la carica presente sulla piastra (B) dovrá fluire verso Terra. Infatti, dopo l'inserimento, essendo entrambe le piastre collegate a massa e quindi al medesimo potenziale, il campo nello spazio compreso tra esse sará nullo e nulla sará la densitá di carica sulla superficie della piastra inferiore (B). Quindi, in seguito all'inserimento della piastra (A), lo strumento (microamperometro) indicato, misurerá un passaggio di corrente, proporzionale al campo E. Una opportuna taratura dello strumento in un campo elettrico noto consentirá di determinare cosí il campo elettrico atmosferico E.

Poiché la carica indotta é piccola, problemi di rumore elettronico ed ambientale renderanno la misura poco precisa. Per migliorare la precisione é possibile utilizzare il sistema indicato in figura 2.

In tale schema la lastra A é costituita da due settori di cerchio (conduttori) (1,2), alternati da due settori vuoti (1',2') ed una analoga struttura ha la lastra B, posta parallelamente al di sotto della lastra A. Al ruotare di quest'ultima attorno al comune asse, i settori "pieni" della lastra B sono alternativamente coperti dagli analoghi settori della lastra A, o esposti al campo elettrico. Ora un microamperometro, inserito tra la lastra B e massa, misurerá un segnale periodico, in fase con la rotazione del sistema. La figura 3 mostra la struttura di uno strumento di questo tipo (JCI 131 Electrostatic Fieldmeter) prodotto dalla John Chubb Instrumentation (UK). Come si vede, ora i settori pieni sono quattro anziche due, ma il principio é il medesimo.

Figure 3:

3 Risultati sperimentali

Misure continue del campo elettrico atmosferico furono iniziate da William Thomson (Lord Kelvin) al Kew Observatory nel 1861. Una gran quantitá di dati di buona precisione furono poi presi sull'oceano dalla nave "Carnegie" nel periodo 1915-1929. Nel corso di tali osservazioni fu scoperta la variazione globale diurna del campo elettrico terrestre, legata al tempo universale (U.T.). Si trovó cioé che il campo elettrico subiva una modulazione giornaliera, che era uguale in tutti i punti della terra se espressa in funzione del tempo di Greenwich, anziché del tempo locale. Le curve che mostrano l'andamento del campo elettrico terrestre in funzione del U.T. sono ancora oggi chiamate "curve di Carnegie".

La figura 4 mostra la curva di Carnegie originale, confrontata con misure del medesimo tipo, effettuate da R.H. Holzworth et al. [2]nel 1984. Questi ricercatori si servirono di palloni aerostatici che consentivano di effettuare misure a circa 26 km di altezza in diverse posizioni geografiche (nell'emisfero sud). Nella figura si noti la scala verticale invertita, per cui il massimo attorno alle ore 19 U.T. sembra un minimo.

4 Tentativi di spiegare i fenomeni osservati

Per spiegare la presenza di tale campo elettrico, Thomson propose di considerare la ionisfera come l'armatura positiva di un condensatore sferico, carico ad una differenza di potenziale di 260 KV rispetto alla Terra che costituisce l'armatura negativa. Oggi sappiamo che una corrente fluisce continuamente tra l'armatura positiva

e quella negativa di questo "condensatore globale". Si stima che la corrente totale che in tal modo tende a scaricare il consensatore ammonti a circa 1000 Ampère (integrata su tutta la Terra).

É possibile valutare approssimativamente la costante di tempo con cui questo condensatore si scarica. Per farlo occorre valutare la resistenza equivalente attraverso cui avviene la scarica. A tale scopo occorre esaminare la conducibilitá dell'atmosfera alle varie altezze. Dalle misure di conducibilitá, quali quelle mostrate in figura 5 [3], si vede che il grosso della resistenza elettrica dell'atmosfera é concentrata nei primi $\approx 3\,Km$ al di sopra della

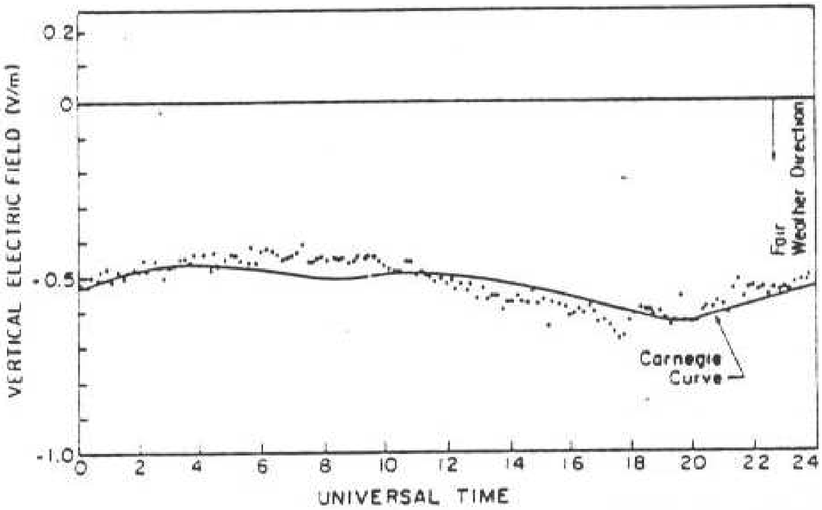

FIG. 2. The 10-min averages of the vertical electric field. All overlapping data from two payloads when the data agreed to within 50 mV/m (10% of mean) for a 16-d period are shown after they have been averaged together. Also shown is the *Carnegie* curve of average surface electric field measurements (Ref. 7).

Figure 4:

superficie Terrestre. La resistenza totale, integrata sull'intera superficie, tra la ionosfera e la Terra, é pari a circa 200Ω; un valore estremamente piccolo. Per ció che riguarda la capacitá, presa la Terra come l'armatura interna, si ammette che l'armatura esterna equivalente sia da considerare ad un'altezza di circa 6 Km. La capacitá che cosí si ottiene é $\approx 1 Farad$ e la costante di tempo sará $\tau = RC \approx 200\, s$.
Il nostro condensatore globale si scaricherebbe quindi in un tempo estremamente breve se un qualche meccanismo non intervenisse a ricaricarlo, in tempi dello stesso ordine di grandezza.

Vari meccanismi sono stati proposti per spiegare il processo di ricarica. Tra questi il piú accreditato é costituito dai temporali, dove le precipitazioni ed i fulmini portano a terra grandi quantitá di elettricitá negativa.

Prima peró di occuparci di questo problema, vogliamo cercare di capire, almeno qualitativamente, l'andamento in funzione dell'altezza della conducibilitá elettrica media.

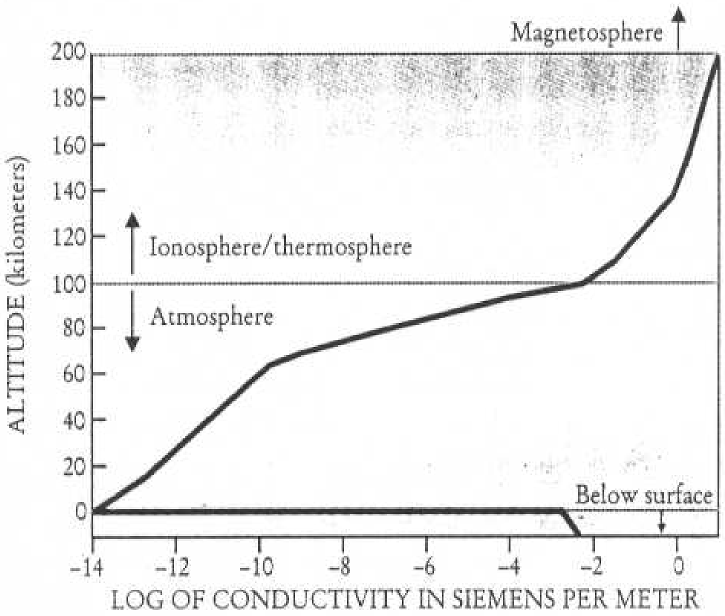

FIGURE 3. CONDUCTIVITY PROFILE. The electrical conductivity of Earth's surface and atmosphere is plotted as a function of altitude.

Figure 5:

5 Conducibilitá elettrica dell'atmosfera

Sappiamo che la densitá atmosferica decresce con l'altezza in modo esponenziale:

$$d = d_0 \, e^{-\frac{h}{L_0}}$$

dove d_0 é la densitá al suolo ed L_0 vale $\approx 7-9Km$. La conducibilitá elettrica dell'atmosfera é in larga misura dovuta a ioni, cioé molecole ionizzate. Tra queste troviamo prevalentemente molecole di ossigeno che hanno elettroni in eccesso e sono quindi cariche negativamente, e ioni positivi CO_2. Gli elettroni, almeno a basse quote, non contribuiscono alla conducibilitá poiché il loro cammino libero medio é estremamente piccolo. Ma cosa é che causa la ionizzazione ? Misure effettuate hanno dimostrato che, in normali condizioni atmosferiche, sulla terraferma, coppie ione-elettrone vengono prodotte ad un rate di circa 10^7 per secondo e per metro cubo. Le cause di tale processo sono la radioattivitá naturale ed i raggi cosmici. Le collisioni delle particelle di alta energia contenute nella radiazione cosmica (principalmente mesoni μ) con molecole dell'aria, danno luogo alla formazione di ioni. A quote non grandi domina il contributo della radioattivitá naturale della terra. Ad altezze via via crescenti il rate di produzione di coppie elettrone-ione da parte dei raggi cosmici diviene dominante rispetto a quello dovuto alla radioattivitá. A grandi altezze la ionizzazione é quasi esclusivamente dovuta ai raggi cosmici ed alla radiazione solare (radiazione ultravioletta e raggi X).

Nel giro di pochi millisecondi dalla loro formazione gli ioni subiscono reazioni chimiche, principalmente con molecole d'acqua, e formano quelli che in letteratura sono chiamati "piccoli ioni", che in genere contengono un elevato numero di atomi. In presenza di nuvole, nebbia o contaminanti vari, i piccoli ioni possono unirsi ad altre molecole, aumentando in tal modo la massa. Ricordiamo ora che la velocitá di drift dei portatori di carica é proporzionale al campo elettrico:

$$v_d = \mu E$$

dove μ, la "mobilitá", é inversamente proporzionale alla radice quadrata della massa dei portatori e direttamente proporzionale al cammino libero medio. Essendo poi la conducibilitá σ proporzionale alla mobilitá ($\sigma = nq\mu$ con q= carica dei portatori ed n= numero di portatori per unitá di volume), grandi masse degli ioni implicheranno piccole mobilitá e quindi piccole conducibilitá. In effetti, misure di conducibilitá effettuate all'interno delle nuvole hanno dato valori ridotti a circa il 5% del valore che si ha, alla medesima altezza, all'esterno della nuvola. Ció é consistente con il fatto che, data l'elevata presenza di vapor d'acqua e micro-formazioni di ghiaccio all'interno di una nuvola, la formazione di "grandi ioni" é piú abbondante.

Aumentando l'altezza, entro i primi $\approx 60Km$ la densitá diminuisce in modo esponenziale, il che causa un aumento del tempo medio tra collisioni successive e quindi un aumento della mobilitá e della conducibiltá. In realtá, anche se tale aumento, come la diminuzione di densitá, é esponenziale, la lunghezza caratteristica dei due esponenziali é diversa. Cioé la conducibilitá aumenta con l'altezza piú rapidamente di quanto non diminuisca la densitá. Ció é dovuto al fatto che, all'aumentare dell'altezza (almeno sotto i 60 Km) aumenta il flusso dei raggi cosmici e quindi la ionizzazione che essi causano. Ció implica un aumento di n nell'equazione: $\sigma = nq\mu$. L'andamento della conducibilitá in funzione dell'altezza é mostrato in figura 5. Al di sopra dei 60-65 Km, come si puó vedere dalla figura, l'aumento della conducibilitá con l'altezza diviene piú rapido. Ció accade poiché a tali altezze la densitá é abbastanza bassa da consentire agli elettroni liberati nei processi di ionizzazione primari, di rimanere liberi e contribuire cosí alla conducibilitá. Ció non accade alle quote piú basse, dove gli elettroni liberati sono presto "catturati" da una molecola vicina.

La piccola massa degli elettroni fa sí che essi contribuiscano molto alla conducibilitá, essendo elevata la loro mobilitá. Ad altezze superiori ai $\approx 100Km$ la conducibilitá aumenta ad un ritmo ancora piú rapido a causa della ionizzazione causata dai raggi ultravioletti del Sole. Entriamo nella zona della ionosfera.

6 Meccanismi di ricarica del condensatore globale

Veniamo ora al problema del meccanismo che ricarica il nostro "condensatore globale". Dobbiamo affrettarci ad anticipare che il meccanismo non é del tutto chiaro ancora oggi. Si ritiene comunque che almeno tre diversi processi siano all'opera: i temporali, l'interazione tra il vento solare e la magnetosfera e l'effetto dinamo delle maree atmosferiche nella termosfera. Si ritiene che di questi meccanismi, il primo sia di gran lunga il piú importante. Vediamo quindi qualitativamente in cosa consista.

Se immaginiamo di "fotografare" la distribuzione delle cariche elettriche in una nuvola, troviamo che nella parte alta (ad un'altezza tipica di circa 12 Km da terra) della nuvola vi é un eccesso di cariche elettriche positive, mentre nella parte bassa (circa 5 Km) vi é un eccesso di cariche negative. Il meccanismo che produce tale disuniformitá di carica non é del tutto chiaro, ma sappiamo che intervengono fenomeni che toccano la termodinamica, la meccanica dei fluidi, la chimica oltre all'elettricitá. Una spiegazione plausibile dei fenomeni é fornita da R.P. Feynman nel capitolo 9 del suo volume sull'elettromagnetismo.

Il punto ora é che tra la parte bassa della nuvola e la terra esiste una elevatissima differenza di potenziale; questa tuttavia ha segno opposto rispetto a quella presente in condizioni di cielo sereno: il potenziale nella parte bassa della nuvola é inferiore a quello della terra. La differenza di potenziale é ora cosí elevata che puó dare origine ad una scarica elettrica tra la parte bassa della nuvola e la terra. Tale scarica consiste in un grosso flusso di elettroni verso terra. Va detto che si hanno anche scariche all'interno della nube, come pure tra nubi vicine, ma il risultato netto é un flusso di cariche negative verso terra, che in tal modo "ricaricano" il condensatore globale. La pioggia contribuisce anch'essa a portare a terra cariche negative.

Sul lato dell'armatura positiva (la ionosfera) si ha analogamente un intenso flusso di cariche positive. Questo ha luogo tra la parte superiore della nuvola e la ionosfera. La resistenza elettrica totale tra la sommitá della nuvola e la ionosfera é di circa 40 $M\Omega$, che é un valore piccolo rispetto alla resistenza che si trova tra sommitá e fondo della nuvola (diversi $G\Omega$). Il circuito si chiude quindi sulla ionosfera.

La corrente che ha luogo tra la sommitá della nuvola e la ionosfera va sotto il nome di "corrente di Wilson", dal nome di Charles T. Wilson che studió a lungo il problema e che nel 1920 suggerí che i temporali potessero giocare tale ruolo di ricarica del condensatore globale. L'intensitá di tale corrente é stata (e continua ad essere) misurata da aerei fatti appositamente volare ad alta quota in zone attraversate da temporali e si é trovato, per singoli temporali, valori tipici di 1.7 A. Negli ultimi anni sono stati in aggiunta osservati, al di sopra di nubi temporalesche, quelli che sono stati definiti "spettri rossi", che consistono in emissioni elettriche da parte della sommitá delle nubi, le quali si estendono fino ad altezze di circa 95 Km. La durata tipica di una di tali emissioni é estremamente breve (pochi millisecondi) ed esse coprono aree molto vaste delle nubi. Inoltre sono state osservate correlazioni temporali tra tali "spettri rossi" e scariche elettriche tra la parte bassa della nuvola e terra (vedasi il sito WEB: www.space.com/science/planetearth/).
Alcune foto di spettri rossi, riprese dalla NASA, sono visibili al sito indicato. Essi appaiono come giganteschi getti di energia che partono dalla sommitá delle nubi e si estendono fin quasi alla ionosfera. L'altezza tipica della sommitá degli spettri é circa 85 Km. Se ammettiamo che i temporali siano le principale cause del processo di ricarica del "condensatore globale", possiamo comprendere ora perché la modulazione giornaliera del campo elettrico terrestre sia uguale in tutti i punti della terra, con riferimento all'ora di Greenwich. Notiamo intanto che, a causa dell'elevatissima conducibilitá della ionosfera, un temporale, dovunque esso abbia luogo, ha un effetto globale estremamente rapido sulla tensione dell'armatura esterna del nostro condensatore (la ionosfera). Analoga considerazione vale per l'armatura interna (la terra).

Quindi, se per caso dovesse accadere che tutti i temporali avessero luogo alle ore 18 di Greenwich, avremmo che a quell'ora il nostro condensatore globale si ricaricherebbe ed il campo elettrico avrebbe un massimo in tutti i punti della terra.

Ora, non tutti i temporali hanno luogo alle 18 di Greenwich; tuttavia essi hanno una preferenza per tale ora! In effetti, l'andamento globale dei temporali sulla terra in funzione del tempo universale (UT) ha un andamento simile a quello del campo elettrico terrestre, come mostrato nella figura 6.

A sua volta, l'aumento dei temporali in determinate ore del giorno é legato al fatto che questi hanno luogo molto piú frequentemente sulla terraferma, che la piú gran parte della terraferma é concentrata nell'emisfero Nord e che l'attivitá temporalesca é legata all'illuminazione solare. Il fatto che il campo elettrico sia mediamente piú alto in Estate che in Inverno, si spiega facilmente ove si tenga conto del fatto che l'Estate (dell'emisfero Nord) é la stagione in cui si verifica il maggior numero di temporali.

References

[1] J.B. Beal: "Electrostatic fields, electromagnetic fields and ions: Mind/Body environment interrelationships". Biological and Clinical Effects of Low-Frequency Magnetic and Electric Fields. Thoms, Springfield, IL , pp 5-20 (1974)

[2] R.H. Holzworth, T. Onsager, P. Kintner e S. Powell: "Planetary scale variability of the fair-wheather electric field in the stratosphere". Physical Review Letters, 53, 1398

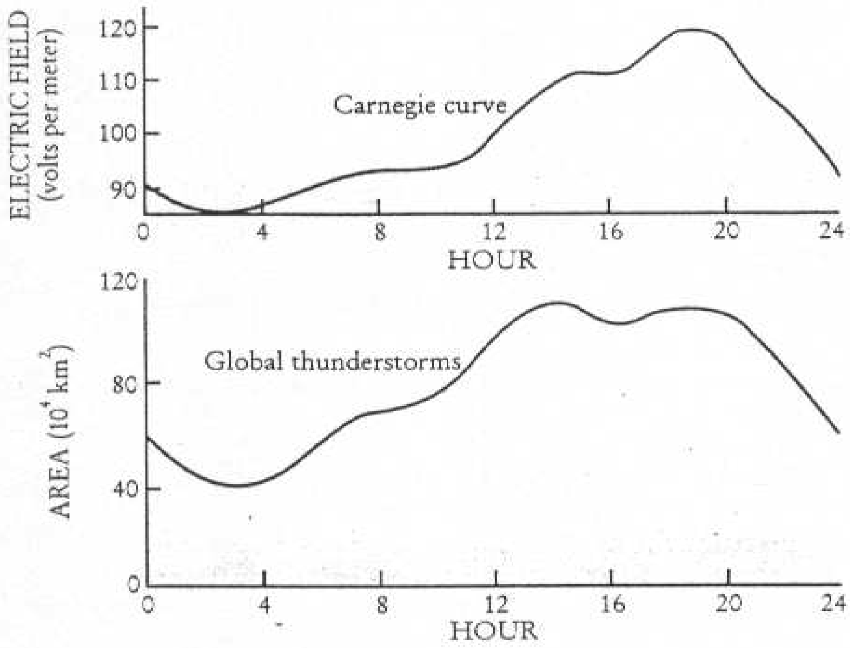

FIGURE 7. DIURNAL VARIATION of electric-field strength and storm area. The top curve is the average potential gradient (the negative of the quantity in the previous figure) measured by the research vessel *Carnegie* during fair weather, plotted as a function of Universal time. The bottom curve is the inferred continental thunder area, also shown as a function of UT. The quantity plotted is the area that would be covered by thunderstorms if thunderstorms occurred only over land and if the probability of thunderstorm occurrence were globally identical to the probability observed as a function of UT at Kew Observatory.

Figure 6:

(1984)

[3] Le misure in questione sono riportate nell'articolo di Edgar A. Bering III, Arthur A. Few e James R. Benbrook: "The global electric circuit", nel numero di Ottobre 1998 di "Physics Today".