

# ANDAMENTO DELLA IONOSFERA A ROMA NEL PERIODO 1948-1953 (\*)

PIERO DOMINICI

*Introduzione.* — Lo scopo della presente comunicazione è quello di presentare un primo risultato delle misure delle caratteristiche ionosferiche eseguite nella stazione ionosferica di Roma dell'Istituto Nazionale di Geofisica nel periodo settembre 1948-aprile 1953, e precisamente l'andamento normale della ionosfera a Roma dedotto dall'esame dei dati raccolti nel periodo anzidetto. All'illustrazione di questo andamento si premettono brevi notizie sulla tecnica dei radiosondaggi ionosferici.

## PARTE I: *Generalità sulla tecnica dei radiosondaggi ionosferici.*

1. — Com'è noto, il metodo sperimentale comunemente impiegato per il rilievo sistematico delle caratteristiche ionosferiche è il metodo dei sondaggi verticali con radioonde ad impulsi. Questo metodo è basato sulla proprietà della ionosfera di riflettere le radioonde.

Infatti è facile vedere che la presenza di elettroni liberi nella ionosfera porta ad una modificazione dell'indice di rifrazione ionosferico; se in una certa regione ionosferica, la frequenza  $f$  di un'onda incidente verticalmente è, in rapporto alla densità elettronica  $N$  della regione, tale da annullare l'indice di rifrazione, cioè se è  $f = \sqrt{\frac{e^2 N}{\pi m}}$  ( $e$ ,  $m$  carica elettrica e massa dell'elettrone), si ha la riflessione dell'onda. La presenza del campo geomagnetico e gli urti che gli elettroni liberi, eccitati dal campo elettrico dell'onda, subiscono con le circostanti molecole neutre complicano notevolmente il processo di riflessione. Per quanto riguarda il campo geomagnetico, esso produce una birifrazione dell'onda, che si divide in due componenti; di queste una però — raggio ordinario — si propaga come si propagherebbe

---

(\*) Comunicazione presentata alla « Association Internationale de Magnétisme et electricité terrestre » nella X Assemblea Generale dell'U.C.G.I. - Roma 1954.

un'onda in un mezzo non sottoposto all'azione di un campo magnetico esterno. L'entità poi della modificazione dell'indice di rifrazione ionosferico dovuta alle collisioni fra elettroni liberi e molecole neutre è trascurabile non appena il quadrato della pulsazione dell'onda incidente sia notevolmente maggiore del quadrato della frequenza delle collisioni; il che si verifica normalmente nei comuni sondaggi ionosferici. In definitiva, se ci si riferisce al raggio ordinario dell'onda, vale comunque la relazione dianzi scritta tra la frequenza dell'onda riflessa e la densità elettronica della ionosfera.

Il metodo dei radiosondaggi ionosferici consiste nell'inviare verticalmente dei brevi impulsi di radioonde di frequenza variabile e di ricevere gli eventuali echi di ritorno dalla ionosfera.

2. — Le informazioni che si ricavano da un radiosondaggio ionosferico sono:

a) il tempo intercorrente fra l'emissione dell'impulso e la ricezione del suo eco dalla ionosfera, il quale tempo è proporzionale all'altezza della zona riflettente. Se la velocità di propagazione dell'onda fosse costante lungo tutto il tragitto ionosferico e pari alla velocità della luce nel vuoto, si avrebbe ovviamente un'altezza di riflessione di 0,15 km/microsecondo. In realtà il ritardo introdotto dall'essere la ionosfera un mezzo dispersivo è notevole, particolarmente in prossimità del punto di riflessione. Risalire dal tempo di trasmissione — e quindi dall'altezza *virtuale* od *apparente* di riflessione  $h' = 0,15 \Delta t$  — all'altezza *vera* della zona di riflessione, significa valutare con esattezza il ritardo subito dall'onda nell'attraversare la regione riflettente, e costituisce un importante problema tuttora aperto nel campo delle ricerche ionosferiche:

b) la frequenza dell'onda riflessa, che è legata, nel modo già visto, alla densità elettronica della ionosfera:

c) l'intensità del segnale riflesso, dal quale, facendone il rapporto all'intensità del segnale trasmesso, si ricava il coefficiente di riflessione ionosferica  $\rho$ .

In generale, dai radiosondaggi ionosferici si possono ricavare le due funzioni:

$$\left\{ \begin{array}{l} h' = h'(f, t), \text{ altezza virtuale in funzione della frequenza e del tempo;} \\ \rho = \rho(f, t), \text{ coefficiente di riflessione in funzione della frequenza e del tempo.} \end{array} \right.$$

Delle due variabili, in pratica se ne tiene una fissa e si varia con continuità l'altra, che può essere la frequenza dell'onda od il tempo, a seconda del tipo di apparato usato.

3. — Generalmente gli Osservatori ionosferici usano, per i radio-sondaggi, apparati registratori automatici del tipo cosiddetto « panoramico », i quali esplorano in breve tempo una vasta gamma di frequenza. Essi consistono schematicamente in un trasmettitore ad impulsi, in un ricevitore accordato nella stessa frequenza del trasmettitore, ed in un adatto registratore dei segnali trasmessi e riflessi.

La difficoltà maggiore che si incontra nel progetto delle ionosonde è quella di mantenere in sintonia perfetta trasmettitore e ricevitore nella vasta gamma di frequenza coperta, che può andare sino a  $1 \div 25$  Mhz. Sino a poco tempo fa si ricorreva a tal fine a dei vincoli meccanici fra gli organi variatori di frequenza del trasmettitore e gli organi variatori di frequenza del ricevitore. Recentemente si è ricorsi a metodi puramente elettronici, per cui, con adatti artifici, si ha un solo organo variatore di frequenza comune sia al trasmettitore sia al ricevitore e quindi una sintonia rigorosa per qualsiasi frequenza. La ionosonda impiegata nella stazione ionosferica di Roma dell'Istituto Nazionale di Geofisica, progettata e costruita dal prof. A. Bolle, è appunto di questo tipo. In breve, il suo funzionamento è il seguente (1).

Un oscillatore, comandato da un piccolo motore elettrico a velocità costante, genera frequenze varianti con continuità da 27 a 46 Mhz circa. In un convertitore di frequenza si opera il battimento tra le frequenze generate da questo oscillatore e la frequenza di 26 Mhz generata da un oscillatore a quarzo. Le frequenze da 1 a 20 Mhz così ottenute vengono inviate ad un amplificatore di potenza ad impulsi a larga banda (aperiodico) e quindi all'antenna trasmittente del tipo aperiodica verticale. Gli echi ionosferici sono raccolti da una seconda antenna ed inviati ad un convertitore di frequenza, in cui, per battimento con la frequenza generata dal comune oscillatore a frequenza variabile, sono convertiti in segnali a frequenza fissa di 26 Mhz; un ricevitore a larga banda tarato su questa frequenza li rivela e li trasforma in impulsi positivi di tensione.

Il registratore consta di un tubo a raggi catodici, al cui complesso di deflessione sono applicate tensioni tali che il pennello elettronico

---

(1) A. BOLLE, *Un nuovo complesso per il rilevamento sistematico delle caratteristiche ionosferiche*. Annali di Geofisica, I. 2 (1948).

percorre a velocità costante con la stessa frequenza degli impulsi il diametro orizzontale dello schermo, in modo che un'estremità del diametro corrisponda all'istante di emissione dell'impulso. La griglia del tubo è polarizzata in modo tale che si abbia il puntolino luminoso sullo schermo solo su comando degli impulsi di tensione provenienti dal ricevitore. In queste condizioni la ricezione di un eco riflesso dalla

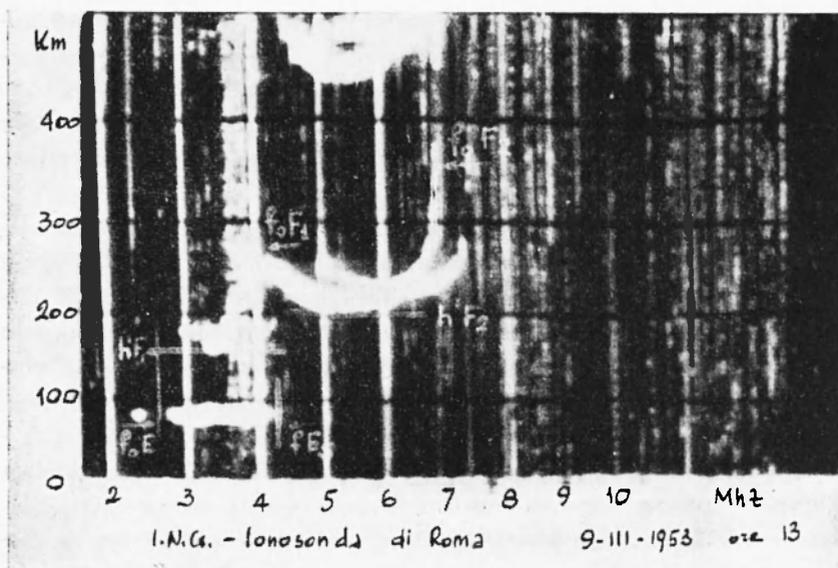


Fig. 1

ionosfera corrisponde all'apparizione di un puntolino luminoso sullo schermo del tubo registratore, ad una distanza dal bordo proporzionale al tempo intercorrente tra l'emissione dell'impulso e la ricezione dell'eco; il diametro orizzontale del tubo è quindi un asse di altezze virtuali. Lo schermo del tubo è fotografato su di una pellicola cinematografica da 35 mm animata da un moto continuo verticale. Variando nel contempo la frequenza dell'oscillatore comune, l'asse verticale di scorrimento della pellicola costituisce un asse di frequenze. In definitiva si ottiene sulla pellicola il tracciamento di una curva riferita ad un piano cartesiano con le altezze virtuali in ordinate e le frequenze in ascisse, la curva cioè  $h' = h'(f)_t$  (fig. 1).

Per quanto riguarda la misura del coefficiente di riflessione ionosferica, o si provvede ad integrare la ionosonda con un adatto regi-

stratore dell'intensità dei segnali trasmessi e riflessi, ottenendo così la funzione  $\rho = \rho(f)_r$ , oppure, ed è questa la soluzione comunemente adottata, si fa uso di un'apparecchiatura distinta. In tal caso si preferisce lavorare a frequenza costante, e la funzione che si ottiene è la  $= \rho(f)_r$ .

4. — Nella stazione ionosferica di Roma dell'Istituto Nazionale di Geofisica, non essendo stata ancora completata l'apparecchiatura per la misura del coefficiente di riflessione ionosferica, si sono eseguite solo misure di altezze di riflessione in funzione della frequenza.

Le caratteristiche generali della ionosonda impiegata dal settembre 1948 al luglio 1952 erano le seguenti:

tipo: panoramico.

sistema: supereterodina.

funzionamento: integralmente automatico.

gamma di frequenza: 0,9 a 14,3 Mhz, esplorata con continuità in 40 secondi.

impulsi: rettangolari di lunghezza 100 microsecondi, alla cadenza di 50 al secondo.

marche di frequenza: ogni Mhz.

marche di altezza: ogni 200 km.

portata: 1300 km.

potenza di cresta: circa 15 kw.

Nel luglio 1952 fu sostituita a questa un'altra ionosonda dello stesso tipo, ma con migliorate caratteristiche elettriche e costruttive. Più precisamente, una più ampia gamma di frequenze (1 a 20 Mhz), lunghezza degli impulsi 100 o 50 microsecondi, cadenza degli impulsi variabile da 30 a 120 al secondo, marcatura di altezza ogni 50 o 100 km, portata variabile da 400 a 4.000 km. Le caratteristiche di registrazione adottate furono: impulsi di 100 microsecondi alla cadenza di 50 al secondo, portata di 500 km, marcatura di altezza ogni 100 km.

Le registrazioni sono state eseguite con la frequenza di una ogni ora a partire dal 1° gennaio 1951; precedentemente il numero delle registrazioni giornaliere era di 16, anziché 24, addensate intorno all'ora dell'alba e del tramonto.

5. — Le ionosonde forniscono dunque direttamente le registrazioni orarie della funzione  $h' = h'(f)$ . Leggere le registrazioni (ionogrammi) significa ricavare da esse i cosiddetti *dati orari* degli strati ionosferici.

È noto che per definire le caratteristiche della ionosfera si ricorre ad una schematizzazione della stessa. La funzione rappresentativa della ionosfera ad un certo istante, cioè la funzione  $N = N(h)_t$ , che dà la densità elettronica  $N$  in funzione dell'altezza dal suolo  $h$ , ha la particolarità di presentare dei massimi relativi di densità elettronica a certe quote relativamente costanti. Si dà il nome di *strati* o *regioni* alle zone della ionosfera caratterizzate da questi massimi di ionizzazione.

Il modello di ionosfera correntemente usato comprende i seguenti strati:

a) *strato F2*, a circa 250 km d'altezza, con densità elettronica massima di circa  $10^6$  elettroni per  $\text{cm}^3$ ;

b) *strato F1*, distinto dal precedente *F2* solo nelle ore diurne, ad un'altezza di circa 200 km, con densità elettronica massima di circa  $5 \cdot 10^5$  elettroni per  $\text{cm}^3$ ;

c) *strato E*, ad un'altezza di circa 100 km, con densità elettronica massima di circa  $10^5$  elettroni per  $\text{cm}^3$ ;

d) *strato E sporadico*, che si presenta occasionalmente alla stessa quota dello strato *E*, con densità elettronica molto maggiore e con caratteristiche generali estremamente diverse.

Di ognuno degli strati *E*, *F1*, *F2* si definiscono due quantità caratteristiche:

a) l'*altezza virtuale* (simboli:  $h'E$ ,  $h'F1$ ,  $h'F2$ ), che viene misurata al livello della minima densità elettronica dello strato, laddove cioè la tangente alla curva  $h'(f)$  è orizzontale (fig. 1). L'altezza virtuale così definita è, almeno per gli strati *E* ed *F1*, l'altezza dal suolo del bordo inferiore dello strato;

b) la *frequenza critica del raggio ordinario* (simboli:  $f_oE$ ,  $f_oF1$ ,  $f_oF2$ ), che è la massima delle frequenze riflesse dallo strato; essendo la frequenza di massimo ritardo, si misura nel punto in cui la tangente alla curva  $h'(f)$  è verticale (fig. 1). La frequenza critica così definita è proporzionale alla densità elettronica massima dello strato; si ha precisamente:  $N_0 = 1,24 \cdot 10^4 f_0^2$  elettroni per  $\text{cm}^3$ , dove  $N_0$  è la densità elettronica massima ed  $f_0$  la frequenza critica del raggio ordinario misurata in Mhz. Nel seguito, parlando di frequenza critica, intenderemo sempre la frequenza critica del raggio ordinario.

Lo strato *E* sporadico non presenta, come gli strati *E*, *F1* ed *F2*, definiti fenomeni di ritardo al passaggio di una radioonda, e non si

può quindi definire per esso una frequenza critica. Per lo strato  $E$  sporadico si misura l'altezza virtuale e la massima delle frequenze riflesse (simboli:  $h'Es$ ,  $fEs$ ).

6. — I *dati orari* che si ricavano da ogni ionogramma sono quindi le altezze virtuali di riflessione e le frequenze critiche (salvo per lo strato  $E$  sporadico) degli strati presenti, ed inoltre i rilievi, espressi in un codice a lettere, su eventuali anomalie osservate, come echi irregolari, tempeste ionosferiche in corso, ecc.

I dati orari sono poi trascritti in tavole mensili, e sotto questa forma costituiscono la base di ogni successiva elaborazione. Questa è evidentemente diversa a seconda della questione per cui i dati orari sono utilizzati, e precisamente a seconda che si voglia mettere in evidenza un fenomeno a breve periodo od un andamento a lungo termine. Generalmente è di grande interesse conoscere l'andamento mensile normale delle caratteristiche ionosferiche; a tal fine si calcola la media ponderata dei dati orari di tutti i giorni del mese, ora per ora. I valori così ottenuti si chiamano *valori mediani mensili*, e, in forma grafica o tabellare, costituiscono la forma tipica dell'informazione ionosferica.

## PARTE II: *Andamento normale della ionosfera a Roma.*

1. — Esaminiamo ora brevemente l'andamento normale delle caratteristiche degli strati  $E$ ,  $F1$  ed  $F2$  ed  $E$  sporadico, quale risulta dai valori mediani mensili elaborati a partire dai dati orari raccolti dalla stazione ionosferica di Roma dell'Istituto Nazionale di Geofisica nel periodo settembre 1948-aprile 1953 <sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup>.

Ad illustrare tale andamento riportiamo in fig. 2 e fig. 3 le curve mediane mensili di frequenza critica ed altezza virtuale di due mesi tipici, uno invernale, uno estivo; in fig. 4 le curve mediane mensili di frequenza critica dello strato  $F2$  per i 12 mesi dell'anno, liberate dalle irregolarità derivanti dal ciclo dell'attività solare; in fig. 5 la curva dei valori medi mensili del numero  $R$  delle macchie solari (numero di Wolff), dei valori mediani mensili di frequenza critica dello strato  $F2$  a mezzogiorno ed a mezzanotte locali, e dei valori mediani

(2) A. BOLLE, S. SILLENI, C. A. TIRERIO, *Registrazioni ionosferiche* (settembre 1948-marzo 1949). *Annali di Geofisica*, II, 3 (1949).

(3) P. DOMINICI, *Valori mediani mensili delle caratteristiche ionosferiche a Roma* (marzo 1949-aprile 1953). *Annali di Geofisica*, VII (1954).

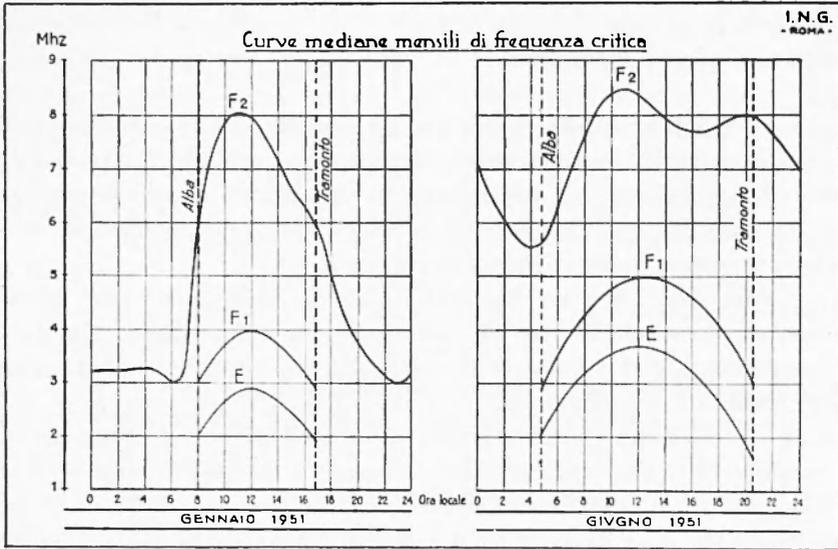


Fig. 2

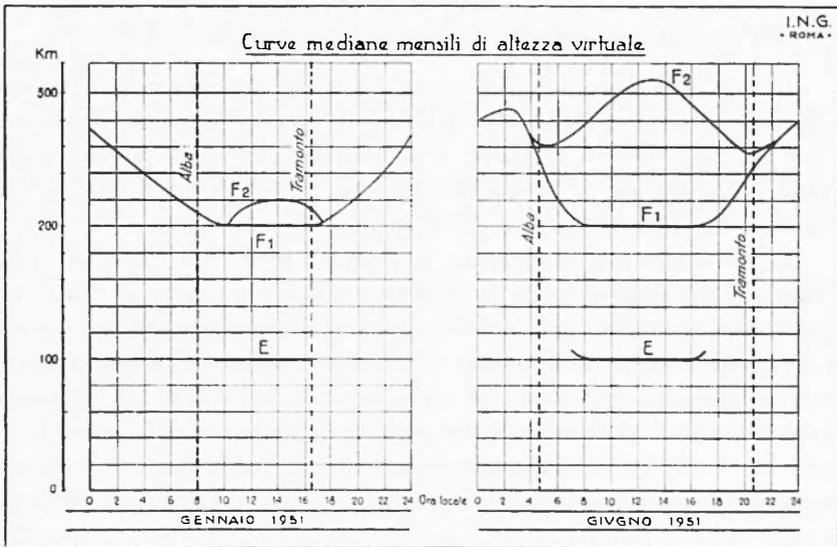


Fig. 3

mensili di frequenza critica dello strato  $F1$  a mezzogiorno locale; in fig. 6 la curva della media a 12 mesi dei valori medi mensili del numero  $R$  delle macchie solari e della media a 12 mesi dei valori mediani mensili di frequenza critica dello strato  $F2$  a mezzogiorno ed a mezzanotte locali; in fig. 7 infine la curva delle percentuali medie mensili di apparizione dello strato  $E$  sporadico. I valori di  $R$  sono quelli forniti dall'Osservatorio Federale Svizzero di Zurigo.

2. — *Strato E.* — Sfortunatamente i dati relativi allo strato  $E$  raccolti a Roma non sono completi, a causa soprattutto del cattivo rendimento alle basse frequenze dell'antenna usata per i sondaggi; sono in ogni modo sufficienti per definire le caratteristiche dello strato.

Lo strato  $E$  è uno strato molto regolare (fig. 2 e fig. 3). L'altezza virtuale si mantiene pressoché costante sui 100 km. Per ciò che riguarda la frequenza critica, e quindi la densità elettronica, i valori notturni sono così bassi che lo strato  $E$  si può chiamare uno strato diurno. La variazione diurna dei valori di frequenza critica mostra una netta simmetria di valori intorno al mezzogiorno locale; la variazione annua dei valori massimi di frequenza critica mostra una altrettanto netta simmetria di valori intorno al solstizio d'estate. Grosso modo, vi è una relazione di proporzionalità tra valori di frequenza critica ed altezza del sole sull'orizzonte, e, per essere più precisi, tra le quarte potenze dei valori di frequenza critica ed i valori del coseno della distanza zenitale del sole. Questo è un fatto sperimentale ben noto, ed è stato verificato anche sui dati ricavati a Roma.

Una spiegazione completa di ciò presumerebbe una conoscenza esatta dei processi di formazione della ionosfera, che ancor oggi non si possiede. Tuttavia una giustificazione preliminare del ruolo giuocato dall'angolo zenitale del sole sulla densità elettronica dello strato  $E$  la si può trovare seguendo la teoria di Chapman sulla formazione degli strati ionosferici. Questa teoria, partendo dall'ipotesi che i gas dell'alta atmosfera siano ripartiti secondo la legge del livellamento barometrico e che gli ioni siano formati per fotoionizzazione solare, giunge a dare una ben nota equazione sulla ripartizione della densità ionica in funzione dell'altezza. In particolare, si ha la seguente relazione fra il tasso di ionizzazione  $q$  (ioni formati per  $\text{cm}^3$  e per secondo) e l'angolo zenitale  $\gamma$  del sole:  $q = q_0 \cos \gamma$ , dove  $q_0$  è il valore di  $q$  per  $\gamma = 0$ .

Per ciò che riguarda la scomparsa degli elettroni liberi formati nel processo di ionizzazione, si possono fare due ipotesi semplificative:

a) che essi scompaiano per ricombinazione ionica; b) che essi scompaiano per attaccamento a molecole neutre. Nel primo caso si ha evidentemente  $\frac{dN}{dt} = q - \alpha N^2$ , dove  $N$  è la densità elettronica ed  $\alpha$  il coefficiente di ricombinazione. Osserviamo che questa relazione presuppone che sia uguale la densità cubica degli elettroni e degli ioni positivi. Ricordiamo poi che  $N$  è proporzionale al quadrato della frequenza critica  $f_0$ . Quando  $\frac{dN}{dt}$  è trascurabile, si vede immediatamente che deve esservi proporzionalità fra i valori di  $\cos \chi$  e di  $f_0^4$ . Nel caso che gli elettroni scompaiano per attaccamento a molecole neutre si possono svolgere analoghe considerazioni, ed arrivare a stabilire una legge di proporzionalità tra  $\cos \chi$  e  $f_0^2$ .

Da quanto detto, sembrerebbe di aver spiegato a sufficienza la riscontrata proporzionalità fra  $\cos \chi$  ed  $f_0^4$ . In realtà le ipotesi su cui si basa la precedente spiegazione sono in contrasto con altri fatti sperimentali. Così, l'esistenza di venti ionosferici mal si concilia con l'ammessa ripartizione barometrica dei gas nella ionosfera; né risultano giustificate le due ammissioni del solo processo di ricombinazione per la scomparsa degli elettroni e di uguali valori per la densità elettronica e la densità degli ioni positivi, assunzioni entrambe in contrasto con le recenti teorie sulle relazioni fra ionosfera e geomagnetismo. La relazione sperimentale  $N^2 = k \cos \chi$  permette di dire con sicurezza solo che gli agenti ionizzanti principali dello strato  $E$  sono radiazioni elettromagnetiche provenienti dal sole.

È stata poi notata anche una certa proporzionalità dei valori massimi di densità elettronica dello strato  $E$  col numero  $R$  delle macchie solari. Alcuni hanno cercato di esplicitare la costante di proporzionalità  $k$  fra  $N^2$  e  $\cos \chi$  in modo da far apparire il termine relativo al numero di Wolff:  $N^2 = a (1 + bR) \cos \chi$ . A parte la rispondenza sperimentale o meno di una siffatta relazione, v'è da rilevare in primo luogo che non è stato dimostrato ancora essere il numero di Wolff l'indice più certo dell'attività solare, ed in secondo luogo che, stante l'arbitrarietà dell'assunzione di simili formule rappresentative, è illusorio giungere per questa via ad attendibili informazioni sul meccanismo di formazione e di sviluppo degli strati ionosferici.

3. — *Strato F1*. — Ciò che abbiamo detto ora a proposito dello strato  $E$ , vale, in linea generale, anche per lo strato  $F1$ . Si vede chiaramente dalla fig. 3 che la regione  $F$ , sovrastante la regione  $E$ , sembra

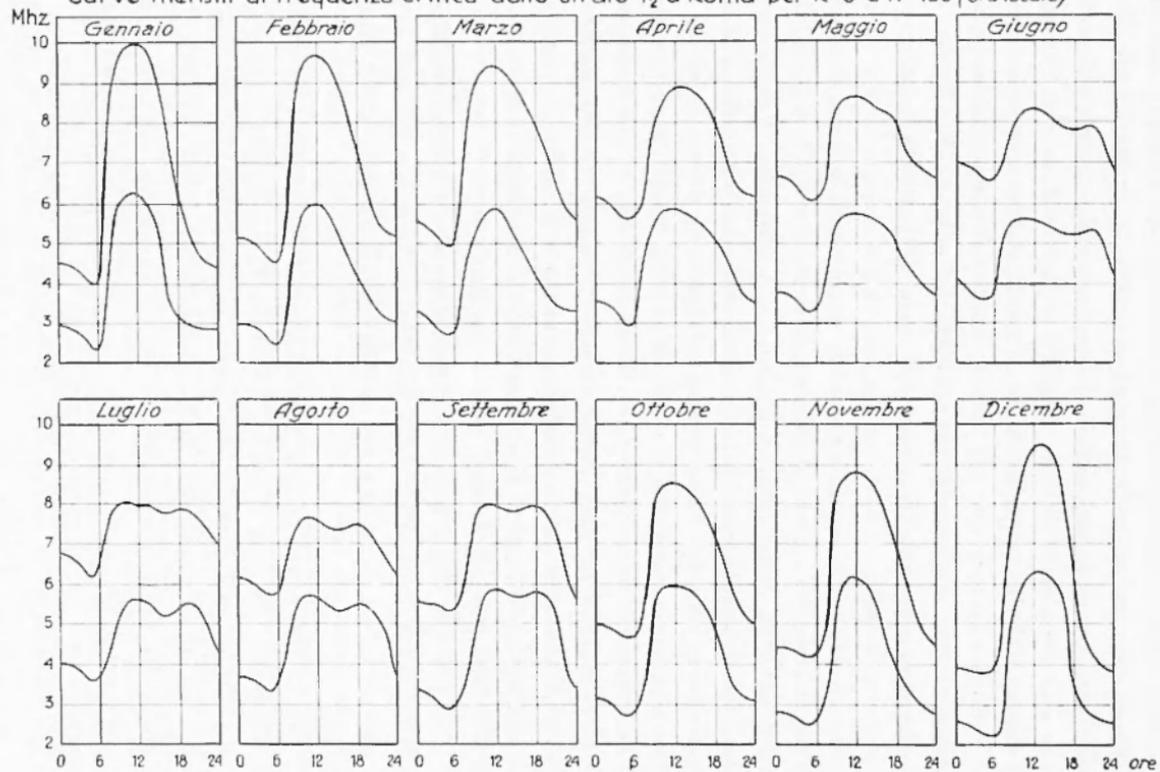
Curve mensili di frequenza critica dello strato  $F_2$  a Roma per  $R=0$  e  $R=100$  (ora locale)

Fig. 4

dividersi in due strati nelle ore diurne. Si dà il nome di  $F1$  alla regione più bassa, la cui altezza virtuale si mantiene sui 200 km circa. Si osservi come la separazione dei due strati sia molto più netta d'estate; in inverno anzi la differenza di altezza virtuale fra  $F1$  ed  $F2$  è così esigua che spesso è impossibile distinguere uno strato dall'altro. Passando alle frequenze critiche (fig. 2), si vede subito che l'andamento dei valori è simile a quello dello strato  $E$ . Anche per lo strato  $F1$  si può quindi affermare che gli agenti ionizzanti preponderanti sono radiazioni elettro magnetiche provenienti dal sole, e (fig. 5) che le sue caratteristiche sono in relazione col ciclo dell'attività solare.

4. — *Strato  $F2$ .* — L'andamento normale di questo strato non è affatto così regolare come quello degli strati  $E$  ed  $F1$ , testé illustrato. Poiché si tratta dello strato più alto e più ionizzato, le sue caratteristiche sono in larghissima parte responsabili del comportamento della ionosfera nei riguardi della radiopropagazione; d'altra parte lo strato  $F2$  presenta una spiccatissima relazione con i fatti geomagnetici. Di qui l'eccezionale importanza che riveste lo studio di questo strato.

L'andamento normale dello strato  $F2$ , quale risulta dalle nostre curve mediane mensili di frequenza critica e di altezza virtuale, mostra una netta differenza di comportamento tra mesi invernali e mesi estivi. I fatti più importanti sono i seguenti:

*a)* per ciò che concerne l'altezza virtuale, i valori più alti sono quelli estivi; d'inverno l'altezza virtuale dello strato  $F2$  assume nelle ore diurne valori di poco superiori od uguali a quelli dello strato  $F1$  (fig. 3);

*b)* la frequenza critica a mezzogiorno raggiunge valori più elevati d'inverno che non d'estate; viceversa la frequenza critica a mezzanotte è più alta d'estate che non d'inverno. Inoltre, mentre d'inverno si ha un solo massimo di frequenza critica, circa a mezzogiorno, d'estate si ha nelle ore meridiane un caratteristico appiattimento od insellamento della curva, con due o più massimi non necessariamente simmetrici intorno al mezzogiorno (figure 4 e 5);

*c)* d'inverno le variazioni di densità elettronica al crepuscolo sono molto forti; d'estate invece sono relativamente deboli, ed è un fatto normale il permanere, d'estate, di elevati valori di densità elettronica nelle ore notturne (figure 2 e 4).

Il carattere di semplice comunicazione del presente lavoro ci impedisce di trattare a fondo i problemi connessi con le singolarità del-

l'andamento normale della regione  $F2$ ; tuttavia esporremo alcune considerazioni generali al riguardo.

Innanzitutto è da osservare che gli alti valori diurni estivi delle altezze virtuali sono in gran parte apparenti, e vanno interpretati tenendo conto del ritardo subito dall'onda nell'attraversare la sottostante regione  $F1$ ; i due strati  $F1$  ed  $F2$  sono realmente molto vicini, sia d'inverno che d'estate, molto più di quanto appaia dall'esame delle curve di altezze virtuali.

Passando all'andamento della frequenza critica, appare evidente che, per la regione  $F2$ , la legge del coseno  $N^2 = k \cos \gamma$  non è verificata né per la variazione diurna né per la variazione stagionale. Gli agenti ionizzanti della regione  $F2$  sono dunque qualcosa di assolutamente diverso dagli agenti ionizzanti delle regioni  $E$  ed  $F1$ , non sono cioè radiazioni elettromagnetiche di origine solare? Si afferma da qualche parte che è così. Noi non siamo di questo parere <sup>(1)</sup>. Innanzitutto esiste un netto massimo diurno, un netto minimo notturno nella variazione diurna; considerando poi i valori a mezzanotte, evidenti massimi estivi e minimi invernali. La fotoionizzazione solare ci deve entrare quindi per qualche cosa. Teniamo presente intanto che sia il coefficiente di ricombinazione sia il coefficiente di attaccamento sono inversamente proporzionali alla temperatura degli elettroni: la scomparsa degli elettroni liberi è più rapida nella regione  $E$  che non nella  $F$ , e, per la regione  $F$ , più rapida d'inverno che non d'estate. È quindi ragionevole che l'andamento dei valori di frequenza critica a mezzanotte locale sia quello riscontrato.

Rimane da spiegare l'andamento dei valori di frequenza critica a mezzogiorno, che presenta dei massimi invernali e dei minimi estivi. Questo fatto a prima vista è paradossale. Coloro che affermano non essere la fotoionizzazione solare responsabile della formazione della regione  $F2$ , spiegano questa stranezza attribuendo all'ipotetico agente effettivo di ionizzazione una minore attività estiva. Più convincente sembra l'ipotesi avanzata da Appleton, che fa giuocare un ruolo importante alla dilatazione termica della regione. Secondo Appleton, è ben ragionevole ammettere d'estate un maggior tasso di produzione di elettroni nella regione  $F2$ , ma la temperatura essendo più alta, più notevole essendo quindi la dilatazione termica, è ragionevole atten-

---

(1) Si tenga presente che stiamo parlando *solo* dell'andamento normale dello strato. Per quello che segue, non si dimentichi il comportamento dello  $F2$  durante le eclissi di sole.

dersi più bassi valori di densità elettronica, cioè di frequenza critica, nelle ore meridiane. Per giustificare l'andamento ricavato sperimentalmente, bisogna ammettere che le temperature estive della regione  $F2$  siano tre o quattro volte più grandi che non d'inverno. In realtà anche questa spiegazione non ci soddisfa del tutto. In primo luogo

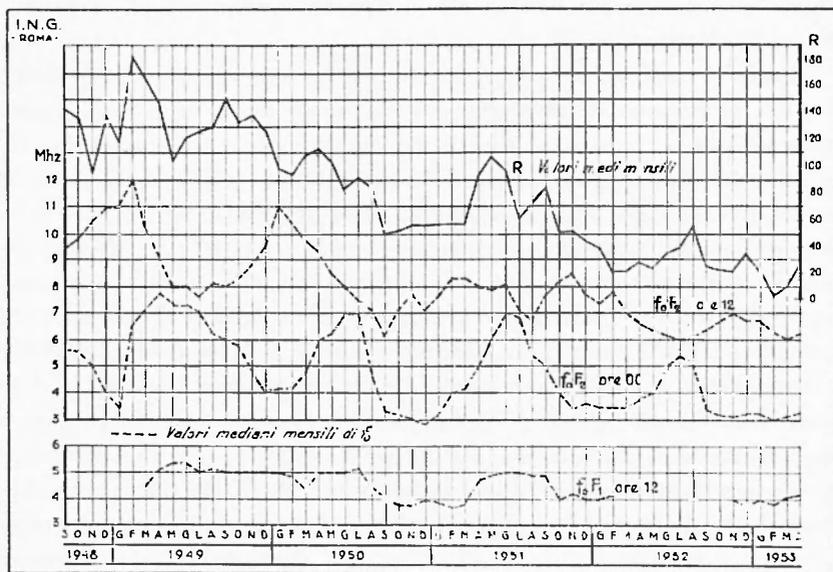


Fig. 5

go è stato dimostrato, pur con qualche riserva, che la variazione stagionale di temperatura sui 250 km di quota è certamente minore di quello che sarebbe necessario secondo l'ipotesi della dilatazione termica. In secondo luogo, ammessa anche l'ipotesi di una notevole dilatazione termica estiva della ionosfera, perché confinare alla sola regione  $F2$  questo fenomeno? La regione  $F1$ , così vicina all' $F2$ , sembra obbedire abbastanza bene alla legge del coseno. Gli alti valori invernali di densità elettronica dello strato  $F2$  nelle ore meridiane si potrebbero spiegare ammettendo che l' $F2$  e l' $F1$  siano parzialmente sovrapposti, dando luogo, nella zona di sovrapposizione, ad una regione con alta densità elettronica, e che vi sia una certa escursione termica stagionale nella regione. In queste condizioni, diminuendo con l'aumentare della

temperatura la scomparsa degli elettroni, il massimo di ionizzazione della regione  $F_2$  si porterebbe d'estate a quota più alta, massima nelle ore meridiane, ed il fenomeno della sovrapposizione risulterebbe meno marcato, o pressoché nullo. Quando però ci si accinge a verificare questa ipotesi od altre sui dati sperimentali, ci si imbatte in enormi

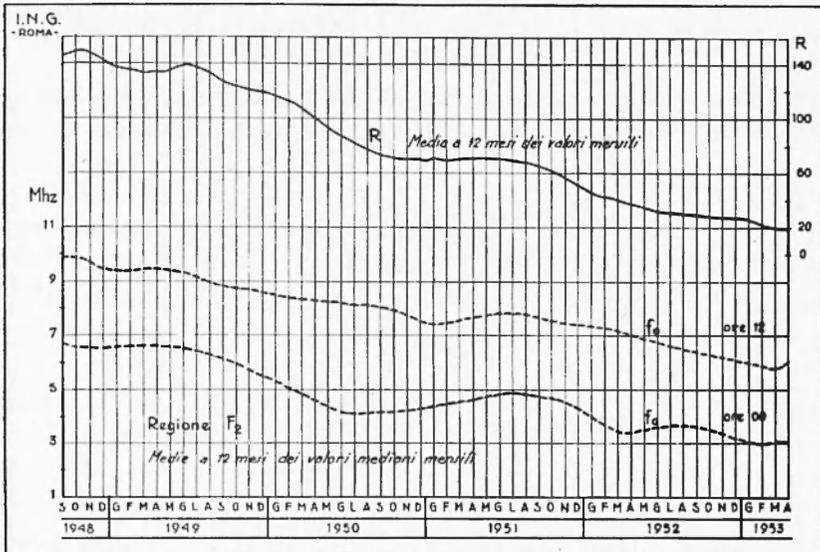


Fig. 6

difficoltà, derivanti dalla insufficiente conoscenza della fisica ionosferica. Conviene quindi, se non si vuole ancor più aumentare l'incertezza che regna in questo campo, limitarsi ad accumulare ancora informazioni sperimentali sempre più vaste, attendibili e dettagliate, prima di lanciarsi in speculazioni di più alto livello.

5. — Abbiamo detto poc'anzi che il numero  $R$  delle macchie solari non è più ritenuto oggi l'indice più sicuro dell'attività solare. È provato anzi che altri fenomeni solari, come le eruzioni cromosferiche, hanno una notevole influenza sulla ionizzazione dell'alta atmosfera. Va notato a questo proposito che è stato osservato come ad una eruzione cromosferica segua la formazione di una macchia nella sottostante fotosfera. Questo potrebbe spiegare in parte la netta correlazione esistente fra l'andamento a lungo termine (medie annuali su

qualche anno) dei valori di densità elettronica della regione  $F2$  ed il numero della macchie solari: si veggia la nostra figura 6. In ogni modo è anche questa una questione del tutto aperta.

6. — *Strato E sporadico.* — Lo strato  $E$  sporadico si presenta a quote variabili fra 80 e 150 km e si differenzia nettamente dagli strati «normali»  $E$ ,  $F1$ ,  $F2$ , essenzialmente per due motivi:

a) intanto manca, o quasi, ogni regolarità nelle sue caratteristiche;

b) in secondo luogo, non presentandosi notevoli fenomeni di ritardazione nella propagazione di una radioonda attraverso questo

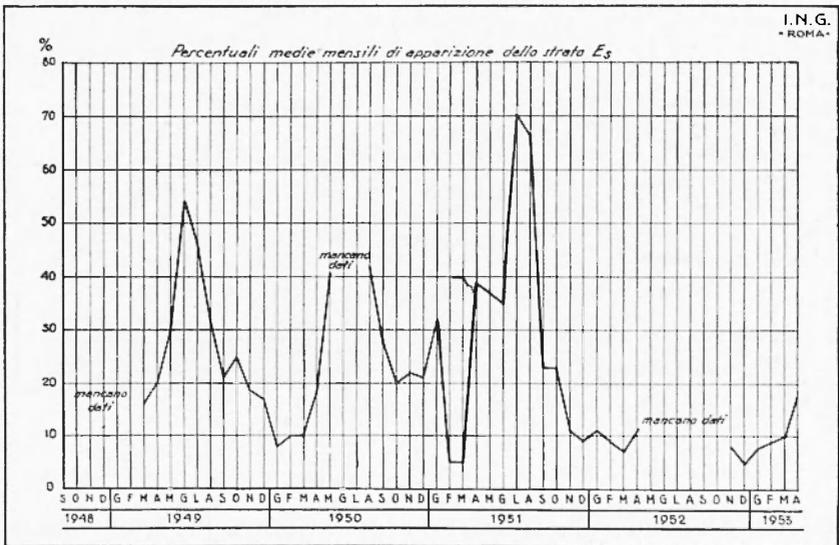


Fig. 7

strato, non si può definire — come abbiamo detto precedentemente — una frequenza critica. La frequenza caratteristica dello strato  $E$  sporadico si definisce come la più alta delle frequenze riflesse dallo strato, ed ovviamente una frequenza siffatta dipende fortemente dalla sensibilità dell'apparato usato. Questo, a nostro parere, spiega perché sinora non si è riusciti a stabilire convincenti correlazioni fra misure di frequenza relative allo strato  $E$  sporadico eseguite in Osservatori diversi; non solo, ma getta un'ombra di dubbio anche sulle misure di uno stesso osservatorio. Per questo motivo, lasciando da parte i valori di frequenza, ci siamo limitati a calcolare le percentuali mensili di apparizione dello strato  $E$  sporadico, come rapporti fra il numero degli

ionogrammi in cui è presente ionizzazione  $E$  sporadica ed il numero degli ionogrammi utili totali, mese per mese. Queste percentuali, dato il basso valore della frequenza iniziale di esplorazione della ionosonda usata (1 Mhz), sono abbastanza significative. L'andamento della curva delle percentuali medie mensili di apparizione dello strato  $E$  sporadico (fig. 7) presenta dei netti massimi nei mesi estivi; non appare invece relazione col ciclo delle macchie solari.

La presenza di questo strato, con densità elettronica sempre cospicua e talora elevatissima — sino a  $3 \cdot 10^6$  elettroni per centimetro cubo — è un fatto molto interessante anche dal punto di vista prettamente geofisico.

La sua particolarissima proprietà di essere semiriflettente per le radioonde, nel senso che dell'energia di un'onda incidente parte si riflette sullo strato, parte va a riflettersi sugli strati sovrastanti, è spiegata ammettendo per lo strato  $E$  sporadico una struttura discontinua, nebuliforme.

Si distingue generalmente lo strato  $E$  sporadico propriamente detto delle latitudini medie e basse dalla ionizzazione  $E$  sporadica delle zone ad elevata latitudine, per la quale si è proposto il nome di «  $E$  aurorale », data la sua stretta relazione con i fenomeni aurorali e geomagnetici. Della formazione dello strato  $E$  sporadico alle latitudini non elevate non è stata data ancora una convincente ragione. Una ipotesi accettata dai più ascrive la formazione dell' $E$  sporadico all'azione ionizzante della polvere delle meteore. Però, a parte il fatto che il calcolo fornisce per la densità elettronica da ionizzazione meteorica valori ben minori di quelli reali, occorrerebbe supporre una distribuzione di polvere meteorica nell'atmosfera terrestre difficilmente giustificabile. Il fatto che l'attività dello strato  $E$  sporadico sia più alta d'estate e, nel corso della giornata, più alta nelle ore pomeridiane, fa pensare che la sua formazione sia in relazione diretta, non esclusiva, con l'evoluzione degli strati normali, con modalità però ancora da determinare.

7. — *Appendice.* — Le curve di fig. 4 possono essere usate per la previsione dei valori di frequenza critica dello strato  $F_2$  a Roma. Esse infatti sono state disegnate per i valori 0 (curve inferiori) e 100 (curve superiori) del numero di Wolff, secondo le modalità prescritte dalla nota circolare 462 del National Bureau of Standards americano. Per un assegnato mese ed il relativo previsto numero di Wolff è facile quindi ricavare una curva di previsione. È da tener presente però che

queste curve si debbono intendere solo approssimative, dal momento che i dati su cui sono state elaborate comprendono neanche mezzo ciclo di attività solare. È nostra intenzione sostituirle con altre più sicure non appena, fra qualche anno, avremo a disposizione i dati ionosferici di Roma per almeno un intero ciclo di attività solare.

*Osservatorio Geofisico di Rocca di Papa dell'I.N.G. — Maggio 1954.*

### RIASSUNTO

*Dall'esame dei dati raccolti nella stazione ionosferica di Roma dell'Istituto Nazionale di Geofisica si è ricavato l'andamento normale della ionosfera a Roma, che è poi illustrato. Si mettono in evidenza le varie questioni teoriche ad esso connesse, e si forniscono le curve provvisorie di previsione delle frequenze critiche dello strato F2 a Roma. All'illustrazione dell'andamento normale della ionosfera a Roma sono premesse alcune notizie generali sulla tecnica dei radiosondaggi ionosferici.*

### SUMMARY

*From an examination of the data gathered at the Ionospheric Station of Rome of the National Institute of Geophysics, the normal behavior of the ionosphere at Rome has been found and is illustrated. The various theoretical questions connected with this behavior are discussed and a provisional curve predicting the critical frequencies of the F2 layer at Rome is furnished. Some general information for the technique of ionospheric radio-sounding is included in the discussion of the behavior of the ionosphere at Rome.*