CONSIDERAZIONI CRITICHE SULLA REGIONE F DELLA IONOSFERA (*)

P. DOMINICI - F. MARIANI

1. *Introduzione.* — È usuale considerare la ionosfera come costituita da due principali stratificazioni di ioni ed elettroni, denominate E ed F , quest'ultima divisa durante il giorno in F_1 ed F_2 ; i tre strati corrispondono a tre regioni ionizzate caratterizzate da un massimo di densità elettronica. Fra i tre strati quello più importante, sia dal punto di vista pratico per quanto riguarda la radiopropagazione, sia dal punto di vista scientifico per quanto riguarda i fenomeni di correlazione con altri fatti geofisici e solari, è lo strato F_2 che ha un comportamento di difficile interpretazione fisica: le numerose ricerche teoriche e sperimentali effettuate non consentono ancora di dar conto di tale comportamento in maniera soddisfacente.

In questa nota esaminiamo criticamente gli aspetti più notevoli delle questioni connesse con la fenomenologia della regione F , rinviando a referenze di carattere generale ⁽¹⁾ ⁽²⁾ per le questioni non considerate esplicitamente o solo accennate.

Per quanto concerne l'origine della regione F , la maggior parte degli Autori ritiene che essa sia prodotta dall'assorbimento di radiazione ultravioletta proveniente dal Sole. In quanto invece alla descrizione teorica del processo di formazione degli strati, il problema è ancora lontano dall'essere risolto; la originaria teoria di Chapman ⁽³⁾ ⁽⁴⁾, che è sufficientemente verificata per gli strati più bassi E ed F_1 , non è senz'altro applicabile allo strato F_2 , che presenta numerose anomalie da essa non previste.

In quanto al tipo di particelle costituenti la regione F possono ritenersi indicativi i risultati dell'osservazione spettroscopica del cielo notturno ⁽⁵⁾ ⁽⁶⁾ ⁽⁷⁾. È accertata la presenza: *a*) di ossigeno atomico O le cui righe caratteristiche ($\lambda = 5577 \text{ \AA}$, verde; $\lambda = 6300$ e $\lambda = 6364 \text{ \AA}$, rosse) sono emesse da una regione che Elvey e Farnsworth ⁽⁸⁾ hanno valutato centrata intorno a 500 km di altezza dal suolo; *b*) di azoto

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

molecolare N_2 le cui righe contribuiscono largamente alla regione bleu dello spettro; c) di sodio Na la cui riga gialla D_1 ($\lambda = 5893 \text{ \AA}$) è emessa da una quota approssimativa di 130 Km secondo Cahannes e collaboratori ⁽⁹⁾ o di 90÷110 km secondo Vegard ⁽¹⁰⁾; nello spettro del cielo notturno sono inoltre presenti alcune bande probabilmente dovute ad ossido di azoto NO , insieme ad altre bande ancora non identificate. Dubbia è la presenza nell'atmosfera notturna di azoto atomico, di idrogeno atomico e molecolare e di gas inerti; per l'azoto atomico, tuttavia, Bernard ⁽¹¹⁾ ha constatato dall'esame dello spettro delle aurore che la frazione di azoto molecolare dissociato varia da circa il 7% a 100 km di quota sino a circa il 75% intorno ai 600÷700 km: tali percentuali vanno probabilmente ridotte al di fuori delle regioni aurorali.

Durante il giorno la composizione dell'atmosfera non è sostanzialmente diversa, a parte variazioni quantitative; la tabella 1 riporta una atmosfera-tipo considerata da Gerson ⁽¹²⁾.

TABELLA 1

peso molecolare	intervallo di quote	percentuale di dissociazione	
		O_2	N_2
$M = M_0 = 28,98$	0-94	0	0
$M = M_0 [1 - c_2 (z - c_3)]^{-1}$	94-100	0-100	0
$M = M' = 23,95$	100-200	100	0
$M = M' [1 - c_4 (z - c_5)]^{-1}$	200-400	100	0-25
$M = 20,61$	400	100	25

$$c_2 = 3,7 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^{-1}; c_3 = 9,4 \cdot 10^6 \text{ cm}; c_4 = 8,09 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^{-1}; c_5 = 2 \cdot 10^7 \text{ cm}$$

Per quanto infine riguarda l'identità delle particelle la cui ionizzazione origina i vari strati ionosferici, varie sono le opinioni. Bhar, Gosh e Mitra ⁽¹³⁾ ⁽¹⁴⁾ ammettono che lo strato F_2 sia dovuto alla fotoionizzazione di ossigeno atomico al suo primo potenziale di ionizzazione (13,5 eV); Wulf e Deming ⁽¹⁵⁾ considerano la fotoionizzazione di azoto molecolare al primo potenziale di ionizzazione (15,5 eV); Bates e Massey ⁽¹⁶⁾ considerano la fotoionizzazione di ossigeno atomico al secondo e terzo potenziale di ionizzazione (16,9 e 18,5 eV rispettivamente) e di azoto molecolare al primo e secondo potenziale di ionizzazione (15,5 e 18,7 eV): dei quattro processi il più importante è il terzo. Per lo strato F_1 invece gli autori predetti ritengono che esso sia dovuto alla fotoionizzazione di azoto molecolare ⁽¹³⁾ ⁽¹⁴⁾ ⁽¹⁵⁾

al secondo potenziale di ionizzazione oppure ⁽¹⁶⁾ di ossigeno atomico al primo potenziale di ionizzazione. Sono state anche considerate due altre possibilità, e precisamente l'una ⁽¹⁷⁾ ⁽¹⁸⁾ che gli strati F_1 ed F_2 siano dovuti ad un solo processo di fotoionizzazione; il massimo di densità elettronica caratterizzante lo strato F_1 sarebbe allora prodotto nel modo « normale » previsto dalla teoria di Chapman, mentre il massimo dello strato F_2 sarebbe dovuto al gradiente verticale positivo di temperatura ed alla sensibile diminuzione con l'altezza del coefficiente di scomparsa degli elettroni a quote superiori a quella del massimo di densità elettronica dello strato F_1 . L'altra ipotesi avanzata da Martyn ⁽¹⁹⁾ è che il comportamento dello strato F_2 vada attribuito all'effetto delle maree solari sulla morfologia dello strato stesso.

2. *Risultati sperimentali.* — Il metodo comunemente impiegato per lo studio delle caratteristiche della ionosfera è il ben noto metodo dei radiosondaggi ad impulsi ⁽¹⁾ ⁽²⁰⁾.

Esso fornisce direttamente la densità elettronica delle regioni E ed F in funzione dell'altezza virtuale.

Il metodo dei radiosondaggi ionosferici è soggetto ad alcune limitazioni, in parte inerenti alla natura del metodo, in parte derivanti dalla tecnica di impiego. Innanzi tutto esso si applica solo al rilievo della concentrazione elettronica nella ionosfera, nulla potendoci dire sulla concentrazione ionica; è altresì impossibile avere a suo mezzo informazioni dirette sulla parte di una regione ionosferica estendentesi al di sopra della zona di massima densità elettronica; infine i dati che si ottengono vanno ridotti dalle altezze virtuali alle altezze vere. In secondo luogo il rilievo delle caratteristiche ionosferiche a mezzo di radiosondaggi è forzatamente discontinuo nel tempo, per evidenti ragioni di ordine pratico: nella più parte delle stazioni ionosferiche i sondaggi sono eseguiti con la frequenza di uno ogni ora; d'altra parte la necessità di automatizzare le operazioni di sondaggio e di registrazione limita alquanto la precisione delle misure. L'incertezza delle misure si può ritenere che sia dell'ordine di almeno ± 50 kHz per le frequenze e di almeno ± 5 km per le altezze; sta di fatto che la maggior parte dei dati pubblicati dai vari servizi ionosferici arrotonda le frequenze al decimo di MHz e le altezze ai 10 km. Tuttavia la generale adozione di questo metodo nei numerosi Osservatori ionosferici oggi distribuiti su quasi tutto il mondo ha permesso di conoscere con sufficiente esattezza la fenomenologia delle regioni E ed F .

Per ciò che concerne la regione F , l'esame delle registrazioni iono-

sferiche mostra che essa assai frequentemente si divide nelle ore diurne in due strati distinti. Si è convenuto di chiamare F_1 lo strato a quota più bassa, che è presente solo nelle ore diurne, ed F_2 l'altro, che ha invece carattere permanente.

Le nostre attuali conoscenze sull'andamento delle caratteristiche della regione F si possono compendiare come segue.

Strato F_1 .

Il comportamento di questo strato è estremamente simile a quello dello strato E , e caratterizzato quindi da una grande regolarità.

Le variazioni della altezza virtuale $h'F_1$ sono contenute entro limiti molto modesti, con tendenza ad assumere valori minimi intorno a mezzogiorno. L'andamento diurno della frequenza critica f_0F_1 è caratterizzato da una notevole simmetria di valori intorno al massimo meridiano; l'andamento annuo è simmetrico rispetto al massimo occorrente circa al solstizio d'estate. Il comportamento dei due strati F_1 ed E è analogo anche rispetto al ciclo delle macchie solari, e questo porta a concludere che lo strato F_1 è sottoposto al controllo solare con le medesime modalità dello strato E .

Strato F_2 .

L'andamento normale dello strato presenta, rispetto a quello degli strati F_1 ed E , delle singolarità veramente notevoli. Questo strato è inoltre sottoposto ad un energico controllo geomagnetico, per cui v'è una sensibile differenza di comportamento fra stazioni poste a differente latitudine magnetica. Le caratteristiche più notevoli dell'andamento « normale » dello strato F_2 sono le seguenti:

a) L'altezza virtuale $h'F_2$ presenta un massimo diurno, occorrente circa a mezzogiorno, un massimo notturno, occorrente circa a mezzanotte, e due minimi occorrenti circa all'alba ed al tramonto; nei mesi estivi poi i valori di $h'F_2$ sono assai più alti che nei mesi invernali.

b) La frequenza critica f_0F_2 presenta nei mesi invernali un massimo diurno occorrente circa a mezzogiorno; nei mesi estivi invece si hanno in genere due massimi diurni, occorrenti prima di mezzogiorno e prima del tramonto; nelle ore notturne infine si ha un solo minimo occorrente poco prima dell'alba.

c) Le variazioni di frequenza critica all'alba ed al tramonto sono molto più rapide nei mesi invernali che non nei mesi estivi.

d) L'andamento annuo di f_0F_2 a mezzanotte ha un massimo estivo ed un minimo invernale; viceversa a mezzogiorno si ha un

massimo invernale ed un minimo estivo, a medie latitudini e nell'emisfero Nord.

e) L'andamento a lungo termine di f_0F_2 è in più stretta correlazione con il ciclo delle macchie solari che non quello di f_0E ed f_0F_1 ; inoltre, per una stessa variazione del numero di Wolff, la corrispondente variazione di f_0F_2 a mezzogiorno è più forte nei mesi invernali che non nei mesi estivi.

Quanto detto sinora vale per Osservatori situati a latitudine magnetica media, il comportamento dello strato F_2 per Osservatori a latitudine magnetica bassa ed alta essendo alquanto diverso. In generale si ha reciprocità di comportamento per Osservatori ad uguale latitudine magnetica; fa eccezione la zona compresa nei $\pm 20^\circ$ di latitudine magnetica, in cui si ha un marcato effetto di longitudine, a seconda che l'equatore geografico coincida con quello magnetico, oppure risulti a Nord o a Sud rispetto ad esso.

Per quanto riguarda l'andamento dello strato F_2 in condizioni perturbate, vi sono da notare principalmente due punti:

f) Le tempeste magnetiche producono in generale una diminuzione di frequenza critica ed un aumento di altezza virtuale; nei mesi invernali si ha frequentemente un comportamento inverso.

g) Un'eclisse di Sole provoca in generale una diminuzione di frequenza critica ed un aumento di altezza virtuale, effetti questi che, a parità di ogni altro fattore, sono più marcati per eclissi occorrenti nei mesi invernali ed in ore non meridiane.

3. *Interpretazione critica dei risultati sperimentali.* — In questo paragrafo discuteremo vari schemi di interpretazione, considerando i due casi in cui si assume la regione F costituita a) da due strati distinti F_1 ed F_2 , oppure b) da uno strato unico dalla cui biforcazione derivano due sottostratificazioni F_1 ed F_2 . Nel seguito esamineremo soprattutto il comportamento dello strato F_2 e considereremo lo strato F_1 soltanto per ciò che lo ricollega allo strato F_2 , in quanto, allorché esso presenta chiaramente una propria fisionomia, le sue caratteristiche si accordano con sufficiente approssimazione, come si è detto, con la teoria classica di Chapman.

Generalmente si ammette per lo strato F_2 la validità della teoria della fotoionizzazione di Chapman e si cerca di interpretare le anomalie dello strato facendo intervenire concomitanti fenomeni perturbativi. L'anomalia più appariscente nel comportamento dello strato F_2 è il fatto già notato che i valori più alti della densità elettronica

diurna si hanno in inverno anziché in estate. Appunto per spiegare tale anomalia fu emessa da Appleton e Naismith ⁽²¹⁾ l'ipotesi della dilatazione termica dello strato F_2 , in conseguenza della quale la densità elettronica estiva sarebbe inferiore a quella invernale perché in estate, pur essendo maggiore il numero totale di elettroni nello strato, essi sono distribuiti in un intervallo di quote più esteso. Questa ipotesi però, per consentire l'interpretazione dei dati sperimentali, richiede un rapporto fra temperatura estiva T_e e temperatura invernale T_i nello strato F_2 che appare senz'altro eccessivo; così, per esempio, secondo i dati ottenuti a Slough ⁽²¹⁾ tale rapporto non dovrebbe essere inferiore a 4. Certamente le temperature estive nello strato risultano maggiori di quelle invernali, non tanto però quanto richiesto dall'ipotesi della dilatazione termica. Anche se il calcolo di Godfrey e Price ⁽²²⁾ va aggiornato alle attuali conoscenze sulla costituzione dell'alta atmosfera, non va sottovalutato il fatto che, nell'ipotesi che sussista un equilibrio radiativo tra radiazione incidente e radiazione dissipata in energia termica, questi autori deducono alla quota di 250 km una differenza di temperatura tra estate ed inverno di soli 12 °K e, comunque, a quote diverse variazioni stagionali assai modeste.

Recenti risultati sperimentali sembrano suggerire differenze fra temperature estive e temperature invernali apprezzabili ma ben inferiori a quelle richieste dall'ipotesi della dilatazione termica; così Lepechinsky ⁽²³⁾ trova a Slough $\frac{T_e}{T_i} = 1,46$; Baral e Mitra ⁽²⁴⁾ invece a Calcutta $\frac{T_e}{T_i} = 1,7$ e $\frac{T_e}{T_i} = 1,8$ rispettivamente in periodi di alta e di bassa attività solare. Questi ultimi autori attribuiscono tali rapporti piuttosto elevati anche all'innalzamento estivo della ionosfera verso regioni a temperatura più elevata. È altresì interessante notare che dal calcolo di Martyn e Pulley ⁽²⁵⁾ tra estate ed inverno non dovrebbe riscontrarsi una variazione relativa di temperatura superiore al 25%. Un ulteriore fatto contrastante con l'ipotesi della dilatazione termica è la constatazione che il comportamento stagionale della frequenza critica f_0F_2 a mezzogiorno è diverso nei due emisferi Nord e Sud. Berkner e collaboratori ⁽²⁶⁾ ⁽²⁷⁾ hanno mostrato che all'andamento stagionale « normale » in opposizione di fase nei due emisferi si accompagna un andamento « non stagionale », pure di periodo un anno, ma di identica fase nei due emisferi. Ci sembra perciò che l'ipotesi della dilatazione termica stagionale *non può da sola spiegare l'andamento annuale di f_0F_2 a mezzogiorno*; essa tuttavia può ancora essere considerata per spiegare anomalie di minore importanza.

Per quanto riguarda lo strato F_1 , notiamo che il fatto che per esso si applichi soddisfacentemente la teoria di Chapman porta a ritenere che in esso non debbano esserci sensibili differenze di temperatura fra estate ed inverno.

Ben evidente è pure nello strato F_2 una asimmetria di comportamento rispetto al mezzogiorno. In linea di principio la depressione meridiana di f_0F_2 nei mesi estivi potrebbe spiegarsi con una dilatazione dello strato occorrente nelle ore diurne; a ciò si accompagnerebbe un sensibile innalzamento del livello di massima intensità di ionizzazione e, ove si ammetta la costanza con l'altezza del coefficiente di ricombinazione, anche un corrispondente aumento dell'altezza virtuale $h'F_2$. Questo modello però non ci sembra che possa dar conto in maniera soddisfacente dell'anomalia diurna di f_0F_2 . Se infatti ammettiamo con Gerson ⁽²⁸⁾ che la temperatura nello strato F_2 sia praticamente costante da due ore dopo l'alba sino a due ore prima del tramonto, allora dovremmo osservare a mezzogiorno un massimo di frequenza critica e non un minimo; se poi, ancora con Gerson ⁽¹²⁾, ammettiamo che la temperatura cresca con legge esponenziale dall'alba sino a due ore prima del tramonto (e poi decresca ancora con legge esponenziale fino al valore minimo corrispondente all'alba), allora diventa problematica l'esistenza dei due massimi diurna di frequenza critica, in quanto, come risulta dal caso tipico considerato nella tabella 2, dopo un massimo prima di mezzogiorno, il massimo I della intensità di ionizzazione e con esso f_0F_2 tenderebbe a decrescere rapidamente.

TABELLA 2

Ora	I/I ₀				I ₀ = massimo di I per $\chi = 0^\circ$
	Estate		Inverno		
	T _m = 3T ₀	T _m = 5T ₀	T _m = 3T ₀	T _m = 5T ₀	T ₀ = temperatura all'alba T _m = temperatura due ore prima del tramonto
5	0.125	0.165			In estate: alba alle 4 ^h 35'
6	0.401	0.507			
7	0.632	0.767			tramonto alle 19 ^h 25'
8	0.803	0.942	0.167	0.221	
9	0.916	1.033	0.362	0.447	χ alle 12 ^h = 25°
10	0.965	1.046	0.453	0.522	
11	0.960	0.997	0.465	0.499	In inverno: alba al- le 7 ^h 25'
12	0.905	0.905	0.422	0.422	
13	0.809	0.780	0.342	0.318	tramonto alle 16 ^h 35'
14	0.688	0.637	0.247	0.212	
15	0.550	0.491			χ alle 12 ^h = 65°
16	0.409	0.349			
17	0.270	0.222			

Il problema dell'anomalia diurna della frequenza critica $f_0 F_2$ non può così ritenersi risolto considerando soli effetti di temperatura.

Accanto agli accennati schemi di interpretazione, che ammettono senz'altro l'applicabilità della teoria di Chapman allo strato F_2 , assai promettente appare la teoria delle marce solari nello strato F_2 emessa da Martyn ⁽¹⁹⁾ e secondo la quale gli elettroni e gli ioni costituenti lo strato, soggetti a moto traslatorio orizzontale per effetto di marce solari con periodo di 12 ore, vengono ad acquistare una componente verticale di velocità sotto l'influenza deviatrice del campo magnetico terrestre. In tal modo lo strato F_2 , che in assenza del campo magnetico terrestre sarebbe uno strato di Chapman, viene a subire delle distorsioni assai sensibili, in senso tale da poter render conto del comportamento dello strato F_2 in condizioni non perturbate. Recentemente Maeda ⁽²⁰⁾ ⁽³⁰⁾ ha applicato la teoria di Martyn allo studio delle caratteristiche dello strato F_2 in condizioni perturbate ottenendo risultati che non possono considerarsi sufficientemente vagliati dall'esperienza né a favore né a sfavore. In conclusione, sono necessari ulteriori studi al fine di permettere un più preciso confronto quantitativo fra la teoria ed i risultati dell'esperienza, tenendo nel dovuto conto la variabilità con l'altezza della temperatura e del coefficiente di ricombinazione, ed il fatto che il generalmente supposto equilibrio ioni-elettroni è verificato solo approssimativamente nello strato F_2 .

Un punto che ci sembra non sia stato sufficientemente considerato è il fatto che gli strati F_1 ed F_2 sono parzialmente sovrapposti d'estate e si identificano praticamente in un'unica regione durante l'inverno: a nostro avviso occorre considerare più da vicino ciò che accade nella regione in cui si ha la sovrapposizione dei due strati.

Si consideri uno ionogramma del tipo indicato in fig. 1. La cuspidè A rivela una discontinuità della curva dell'altezza virtuale $h'(f)$, ciò che si interpreta dicendo che alla quota (*geometrica, non virtuale*) z_A alla quale viene riflessa l'onda di frequenza f_A comincia la distribuzione di densità elettronica dello strato F_2 e chiamando la frequenza φ_c frequenza critica dello strato F_2 . Ora, se lo strato F_2 è originato indipendentemente dallo strato F_1 e se, come è presumibile, la distribuzione di densità dello strato F_1 si estende anche al di sopra di z_A , quello che comunemente si chiama strato F_2 andrebbe piuttosto considerato come uno strato F_2 « apparente » la cui frequenza critica è, per così dire, il risultato di una maggiore o minore sovrapposizione delle densità elettroniche $N(z)$ e $\nu(z)$ rispettivamente dello strato

F_1 e dello strato F_2 vero e proprio. Naturalmente, perché gli strati F_1 ed F_2 possano considerarsi ciascuno dotato di una propria fisiologia occorre che essi siano originati nella ionizzazione di due differenti tipi di atomi o molecole (o di uno stesso tipo ma a differenti livelli di ionizzazione); in quanto invece al meccanismo ed alla legge di sovrapposizione delle densità elettroniche $N(z)$ e $\nu(z)$, sono stati

Fig. 1

studiati certi casi particolari ⁽³¹⁾ ⁽³²⁾. Un modello di sovrapposizione lineare (tra strati parabolici) è stato assunto per l'interpretazione degli ionogrammi ottenuti nella stazione ionosferica di Roma; l'andamento della densità elettronica al di sopra della quota z_u in generale non è risultato parabolico come invece ci si dovrebbe aspettare, per cui è parso che il modello di sovrapposizione lineare, almeno a Roma, non sia rispondente alla realtà fisica. È parso invece suscettibile di migliori risultati un modello di sovrapposizione quadratica, derivante dalle equazioni che esprimono le condizioni di equilibrio ioni-elettroni (nell'ipotesi che di equilibrio si possa parlare). D'altra parte Chatterjee ⁽³³⁾, con un modello di sovrapposizione lineare, ha constatato talune regolarità di comportamento della regione F nel suo complesso, conside-

rando il contenuto elettronico totale di una colonna verticale di atmosfera di sezione unitaria ed estesa a tutta la regione F , ciò che potrebbe chiamarsi « pressione elettronica ». Talune regolarità nell'andamento della pressione elettronica del solo strato F_2 sono state pure osservate da Ratcliffe ⁽³⁴⁾ ⁽³⁵⁾; d'altra parte altri autori ⁽³⁶⁾ ⁽³⁷⁾, che pure hanno usato un metodo di analisi degli ionogrammi sostanzialmente simile, non hanno riscontrato le regolarità osservate da Ratcliffe.

Occorre da ultimo sottolineare, ed è questa una osservazione di carattere generale, che se non vale la teoria di Chapman nella sua forma originaria per un'atmosfera isoterma, l'andamento della densità elettronica di uno strato è notevolmente diverso da quello parabolico; così pure, nello studiare il comportamento della regione F per angoli zenitali del Sole abbastanza grandi, occorre tener presente la sfericità della terra specialmente nell'ipotesi che la temperatura vari con l'altezza: già per $\chi = 70^\circ$, e quindi per buona parte del giorno invernale a media latitudine, si possono avere ⁽³⁸⁾ sensibili differenze nei valori della intensità di ionizzazione calcolati a seconda che si assuma la ionosfera stratificata secondo piani paralleli oppure secondo superfici sferiche concentriche, com'è in realtà.

A prescindere dalla particolare legge con cui le due densità elettroniche $N(z)$ e $\nu(z)$ danno luogo, nella zona di sovrapposizione, alla formazione dello strato F_3 « apparente », è evidente, che, in un modello di sovrapposizione, la densità elettronica corrispondente alla frequenza critica misurata f_0F_3 è tanto più alta quanto più alto è il « grado di sovrapposizione » dei due strati F_1 e F_2 « vero ». Sembrerebbe di poter assumere come indice del grado di sovrapposizione la differenza tra le altezze virtuali $h'F_1$ e $h'F_2$. Dall'andamento di questa differenza risulta un grado di sovrapposizione molto basso d'estate, e particolarmente a mezzogiorno; risulterebbero quindi spiegate, sia pure solo qualitativamente, le anomalie dell'andamento della frequenza critica f_0F_3 . Va però subito notato che se gli strati F_1 ed F_2 « vero » sono del tipo di Chapman, il fatto che la loro separazione vada aumentando dall'alba al mezzogiorno per tornare poi a decrescere nel pomeriggio porta come conseguenza che la scala delle altezze H_1 dello strato F_1 sia maggiore della scala delle altezze H_2 dello strato F_2 ; ciò vorrebbe significare che la massa degli ioni costituenti l' F_1 (ossigeno atomico?) sarebbe notevolmente minore di quella degli ioni costituenti l' F_2 (azoto molecolare?), cosicché, pur essendo la temperatura nello strato F_2 maggiore che in quello F_1 , risulti $H_2 < H_1$ quest'ultima assunzione con-

trasta tuttavia con parte dei risultati sperimentali o delle assunzioni teoriche fatte in proposito (tabella 3). D'altra parte la possibilità che gli strati F_1 e F_2 siano dovuti rispettivamente alla fotoionizzazione di ossigeno atomico e di azoto molecolare è proprio quella considerata come la più importante da Bates-Massey ⁽¹⁶⁾.

TABELLA 3

Autori	Scala delle altezze in km		
	F	F_1	F_2
Appleton ⁽³⁹⁾	40		70
Appleton-Beynon ⁽⁴⁰⁾	45	55	45-70
Booker-Seaton ⁽⁴¹⁾			50-90
Fuchs ⁽⁴²⁾			110
Gerson ⁽²⁹⁾			67-117
Guba ⁽⁴³⁾			105-186 ^(b)
Jones ⁽⁴⁴⁾	6-32 ^(a)		46-54 ^(b)
Jones-Jones ⁽⁴⁵⁾	15-56 ^(a)		
Kellogg ⁽⁴⁶⁾		43 ^(b)	170 ^(b)
Mariani ⁽³²⁾		61	42
Nicolet ⁽⁴⁷⁾		30	60
Pekeris ⁽⁴⁸⁾			20-30
Pierce ⁽⁴⁹⁾			65 $\pm$ 5
Rydbeck ⁽⁵⁰⁾			37-58
Rydbeck ⁽⁵¹⁾		35	51-165 ^(b)

(^a) Valori artici.

(^b) Valori equatoriali.

Per quanto riguarda il diverso comportamento stagionale della densità elettronica all'alba ed al tramonto si può osservare che nei mesi invernali sia i valori di frequenza critica a mezzogiorno sia le variazioni di densità elettronica ai crepuscoli sono maggiori che nei mesi estivi; ciò potrebbe far pensare ad un legame fra le cause determinanti dei due fenomeni (forse il grado di sovrapposizione degli strati F_1 ed F_2 maggiore d'inverno che d'estate?): il problema, che presenta grande interesse, rimane tuttora insoluto.

Variazioni del grado di sovrapposizione potrebbero altresì essere invocate per comprendere certi effetti di una eclisse di Sole sulla ionosfera: attribuendo la diminuzione di frequenza critica f_0F_2 (*) alla

(*) Talora tuttavia ⁽⁵²⁾ è stato notato un aumento di f_0F_2 nella prima fase dell'eclisse.

diminuzione della intensità di ionizzazione e l'aumento di altezza virtuale $h'F_2$ ad un effettivo innalzamento dello strato, occorre allora spiegare perché tali effetti sono più marcati per eclissi occorrenti nei mesi invernali ed in ore non meridiane, cioè quando l'angolo zenitale del Sole è grande e pure grande il grado di sovrapposizione degli strati F_1 ed F_2 : ciò invero potrebbe interpretarsi semplicemente osservando che l'effetto di una diminuzione del grado di sovrapposizione è tanto più sensibile quanto più questo è grande.

Naturalmente, essendo le considerazioni svolte più o meno qualitative, si rende necessario approfondirle convenientemente allo scopo di vagliare quantitativamente con i dati dell'esperienza il nostro modello di ionosfera.

Una ulteriore questione che va interpretata con grande cautela è, a nostro avviso, l'aumento dell'altezza virtuale $h'F_2$ al diminuire dell'angolo zenitale del Sole, più sensibile d'estate che d'inverno e ancor più sensibile quanto più vicine sono le frequenze critiche f_0F_1 e φ_c . Questo aumento di $h'F_2$, potrebbe in linea di principio essere del tutto apparente, d'estate perché è maggiore che non d'inverno il ritardo subito dall'onda esplorante nell'attraversare lo strato F_1 , a causa della maggiore densità elettronica di quest'ultimo, e quando invece sono prossime le frequenze f_0F_1 e φ_c perché ancora notevole è il ritardo subito nello strato F_1 da onde la cui frequenza sia compresa fra le due frequenze critiche. Queste osservazioni qualitative vengono confermate quantitativamente, almeno in certi casi numerici. Ad esempio nella fig. 2 sono riportati i risultati del calcolo dell'altezza virtuale per una regione F in un giorno estivo a media latitudine e così costituita: spessore z_0 e ζ_0 degli strati F_1 ed F_2 « vero », 100 km e 50 km, rispettivamente; $f_0F_1 = 3$ MHz, $f_0F_2 = 4$ MHz, altezza dei due massimi di densità elettronica coincidente alle ore 7 del mattino; i due strati vengono considerati parabolici e sovrapposti con legge lineare e con legge quadratica. Tenuto conto dell'abbassarsi dello strato F_1 e dello strato F_2 e dell'aumentare delle frequenze critiche al diminuire dell'angolo zenitale del Sole, si ottengono le curve riportate in fig. 2 *a*; un calcolo analogo, nel caso $z_0 = 100$ km, $\zeta_0 = 80$ km, dà invece le curve riportate in fig. 2 *b*, da cui si rileva una piccola diminuzione dell'altezza virtuale $h'F_2$. Ci sembra quindi di poter affermare che, in generale, l'aumento meridiano di $h'F_2$ non indica necessariamente un effettivo innalzamento dello strato; i grafici mostrano chiaramente la possibilità che lo strato F_2 si abbassi durante il giorno, proprio

Fig. 2

nel senso indicato dalla teoria di Chapman, per quanto l'andamento della curva $h'(f)$ possa a prima vista, suggerire un apparente innalzamento dello strato. Analoghe considerazioni possono farsi anche non ammettendo la validità della teoria della sovrapposizione.

Consideriamo ora la possibilità che la regione F sia dovuta alla ionizzazione di un solo tipo di particelle; questa possibilità non ci sembra che sia stata studiata con sufficiente dettaglio, e meriterà di essere ulteriormente approfondita. In realtà, nell'esame degli ionogrammi occorre giustificare la discontinuità frequentemente osservata nella curva $h'(f)$; è probabile che la sua corretta interpretazione rivesta più importanza di quanto possa sembrare ad un primo esame. Ovviamente in tal caso la frequenza critica φ_c misurata va senz'altro interpretata come frequenza critica f_oF_2 dello strato F_2 e non valgono le considerazioni critiche svolte sopra nell'ipotesi della sovrapposizione di due strati distinti. Non ci sembra di poter escludere ⁽⁵³⁾ che la discontinuità nella curva $h'(f)$ e la biforcazione della regione F in F_1 ed F_2 possa ritenersi dovuta a una discontinuità o meglio ad una rapida variazione della temperatura con l'altezza (un massimo?). Notiamo che generalmente si ammette per la temperatura dello strato F_2 il valore di $2000 \div 3000$ °K e che, d'altra parte per dar conto della sfuggita dell'elio dall'atmosfera, occorre ⁽⁵²⁾ che alla quota di 600-700 km la temperatura abbia un valore di $1000 \div 1500$ °K; appare allora giustificata la possibilità dell'esistenza nella regione F di un massimo della temperatura. Anche la variazione con l'altezza del coefficiente di ricombinazione generalizzato va ricondotta a quella della temperatura, dalla quale esso dipende in maniera sensibile. In conclusione, vorremmo sottolineare che a nostro avviso l'andamento della temperatura con l'altezza influenza in modo essenziale il comportamento dello strato F .

4. *Conclusioni.* — Da quanto abbiamo detto sopra ci sembra di poter trarre delle conseguenze di carattere generale.

In primo luogo, è necessario migliorare il più possibile la precisione delle misure ionosferiche, soprattutto per quanto riguarda quella relativa alle altezze virtuali; la precisione delle misure attuali è sufficiente per i servizi di previsione per la radiopropagazione, ma è notevolmente insoddisfacente per i fini della ricerca scientifica.

In secondo luogo, è necessario risolvere il problema capitale della riduzione, con la maggior cura possibile, delle altezze virtuali alle

altezze vere, ciò che, fra l'altro, allargherebbe la possibilità di studio della ionosfera al di là di quello dei tradizionali parametri ionosferici, frequenze critiche ed altezze virtuali (minime e massime) di riflessione, le quali ultime del resto non sono, dal punto di vista fisico, così significative come generalmente si ammette. La soluzione di tale problema è notevolmente complicata dal punto di vista del calcolo: sono stati proposti numerosi metodi approssimati, i quali, se da una parte possono rendere piuttosto spedita l'interpretazione delle curve sperimentali, dall'altra hanno il grave inconveniente o di assumere « a priori » un particolare andamento della densità elettronica con l'altezza, sia pure plausibile, oppure di basarsi su approssimazioni analitiche non sempre valide: ci si riferisce in particolare a quei metodi che non tengono conto del campo magnetico terrestre, la cui influenza sull'andamento dell'indice di rifrazione ionosferico è invece, già a medie latitudini, tutt'altro che trascurabile. È opportuno quindi, ai fini della ricerca, arrivare all'interpretazione dei dati facendo il più largo uso possibile di metodi, come per es. quelli proposti da Shinn-Whale⁽⁵⁴⁾ e Kelso⁽⁵⁵⁾, che consentano di dedurre l'andamento della densità elettronica con l'altezza direttamente dalla equazione integrale

$h'(f) = \int \mu' dz$ e includano l'effetto del campo magnetico terrestre.

Roma — Istituto Nazionale di Geofisica — Settembre 1954.

RIASSUNTO

Nella presente nota si discutono criticamente gli aspetti più notevoli delle questioni connesse con la fenomenologia della regione F della ionosfera. Premesse alcune notizie di carattere generale sui probabili processi di formazione della regione, si illustra brevemente il suo comportamento e si mostra che le singolarità che esso presenta sono in sostanza quelle dello strato F_2 le quali non sono di facile interpretazione fisica. Si mostra come l'ipotesi della dilatazione termica dello strato F_2 sia insufficiente a spiegare le anomalie dell'andamento stagionale e diurno e della distribuzione geografica dei valori di frequenza critica dello strato. La dinamo-teoria di Martyn invece sembra dar conto abbastanza bene di queste anomalie in condizioni non perturbate. Viene poi considerata la possibilità della formazione di una zona ad alta densità elettronica derivante dalla sovrapposizione di due strati, F_1 e F_2 « vero ». Tuttavia un tale schema di sovrapposi-

zione, per quanto qualitativamente possa dar conto di alcune anomalie dello strato F_2 , non è ancora interpretabile quantitativamente, a causa essenzialmente della difficoltà di interpretare correttamente l'andamento dell'altezza virtuale $h'F_2$; si fa vedere come un aumento di $h'F_2$ possa in realtà accompagnarsi, almeno in certi casi, ad un abbassamento di quota dello strato. Si considera in seguito la possibilità che la regione F nel suo complesso sia originata da un medesimo processo di ionizzazione e si sottolinea al riguardo l'influenza, forse determinante, dell'andamento della temperatura con l'altezza sulla distribuzione della densità elettronica.

Si rileva infine la necessità di risolvere, con metodi numerici diretti prescindenti dall'assunzione di modelli « a priori », il problema fondamentale della riduzione delle curve sperimentali $h'(f)$ alle curve $N(z)$, al fine: a) di conoscere l'effettiva distribuzione della densità elettronica N con l'altezza dal suolo z ; b) di determinare l'effettivo comportamento degli strati ionosferici nel tempo; c) di studiare i problemi di correlazione con i fenomeni geomagnetici, geofisici e solari in condizioni confrontabili e riproducibili.

SUMMARY

The most notable aspects of the phenomenology of the F region of the ionosphere are discussed in the present note. From some general facts on the general character of the probable formation processes of the region, its behaviour is briefly illustrated and it is shown that the singularities which it presents are in substance those of the layer F_2 ; the physical interpretation is not simple. It is shown that the hypothesis of thermal dilation is insufficient to explain the seasonal and daily anomalies in its behaviour and the geographic distribution of the critical frequencies of the layer. The dynamo theory of Martyn, on the other hand, seems to account rather well for these anomalies under non-perturbed conditions.

The possibility of the formation of a zone of high electronic density from the superposition of F_1 and « true » F_2 layers is then considered. Nevertheless, such a superposition model, although quantitatively it can account for some of the anomalies of the F_2 layer, is not quantitatively calculable, because of the difficulty in the correct interpretation of the virtual height $h'F_2$; it is shown how an increase in $h'F_2$ is, in some cases, accompanied by a decrease in the height of the layer.

The possibility is next considered that the F region in totality has been formed by the same process of ionization, and the influence, perhaps determining, of the behaviour of the temperature with height on the electronic density distribution, is emphasized.

In order to resolve the fundamental problem of the reduction of the experimental curves $h'(f)$ to the curves $N(z)$, it is necessary to use numerical methods not based on the assumption of a priori models, for the purpose of a) knowing the effective distribution of the electronic density as a function of the distance from the ground, z ; b) determining the effective behaviour of the ionospheric layers as a function of time; c) studying the problems of correlation with geomagnetic, geophysical, and solar phenomena under comparable and reproducible conditions.

BIBLIOGRAFIA

- (1) MITRA S. K., *The Upper Atmosphere*, II Edition (1952).
- (2) KUIPER G. P., *The atmospheres of the earth and planets* (1947).
- (3) CHAPMAN S., *Proc. Phys. Soc.*, 43, 26 e 483 (1931).
- (4) CHAPMAN S., *Proc. Phys. Soc.*, 51, 93 (1939).
- (5) DEJARDIN G., *Rev. Mod. Phys.*, 8, 1 (1936).
- (6) ELVEY C. T., *Rev. Mod. Phys.*, 12, 140 (1942).
- (7) PEARSE R. W., *Rep. Progr. Phys.*, 9, 42 (1943).
- (8) ELVEY C. T.-FARNSWORTH A. H.: *Astrophys. J.* 96, 451 (1942).
- (9) CABANNES J., DUFAY J., GAUZIT J., *C. R. Acad. Sci., Paris*, 206, 1525 (1938).
- (10) VEGARD L., *Nature*, 162, 300 (1948).
- (11) BERNARD R., *Ann. Astrophys.*, 4, 13 (1941).
- (12) GERSON N. C., *Rep. Progr. Phys.*, 14, 316 (1951).
- (13) BHAR J. N., *Indian J. Phys.*, 12, 363 (1938).
- (14) MITRA S. K., BHAR J. N., GHOSH B. N., *Indian J. Phys.*, 12, 455 (1938).
- (15) WULF O. R.-DEMING L. S.: *Terr. Magn. Atm. Elect.* 43, 283 (1938).
- (16) BATES D. R., MASSEY H. S. W., *Proc. Roy. Soc.*, 187, 261 (1946).
- (17) MOHLER F. L.: *Bur. Stand. J. Res.* 25, 507 (1940).
- (18) MITRA A. P., *Indian J. Phys.*, 26, 79 (1952).
- (19) MARTYN D. F., *Proc. Roy. Soc. A* 189, 241 (1947); 190, 273 (1947); 194, 429 e 445 (1948).
- (20) DOMINICI P., *Ann. Geofis.* 7, 505 (1954).
- (21) APPLETON E. V.-NAISMITH F.: *Proc. Roy. Soc. A* 150, 685 (1935).
- (22) GODFREY G. H.-PRICE W. L., *Proc. Roy. Soc. A* 163, 228 (1937).
- (23) LEPECHINSKY D., *J. Atm. Terr. Phys.* 1, 278 (1951).
- (24) BARAL S. S.-MITRA A. P., *J. Atm. Terr. Phys.* 1, 95 (1951).
- (25) MARTYN D. F.-PULLEY O. O., *Proc. Roy. Soc. A* 154, 455 (1936).
- (26) BERKNER L. V.-WELLS H. W.-SEATON S. L., *Terr. Magn. Atm. Elect.* 41, 173 (1936).

- (27) BERKNER L. V.-SEATON S. L., Terr. Magn. Atm. Elect. 44, 313 (1939).
- (28) GERSON N. C.: Rev. Mod. Phys. 21, 606 (1949).
- (29) MAEDA K., Rep. Ionosphere Res. Japan 7, 81 (1953).
- (30) MAEDA K., J. Geomagn. Geoelect. 3, 77 (1951); 4, 20 e 83 (1952).
- (31) MARIANI F., Ann. Geofis., 6, 21 (1953).
- (32) MARIANI F., Ann. Geofis., 6, 533 (1953).
- (33) CHATTERJEE B., J. Geophys. Res., 58, 353 (1953).
- (34) RATCLIFFE J. A., J. Geophys. Res., 56, 463, (1953).
- (35) RATCLIFFE J. A., J. Geophys. Res., 56, 487 (1953).
- (36) WHITE G. R.-WACHTEL I. S., J. Geophys. Res., 54, 239 (1949).
- (37) ALPERT Y. L., J. Exp. Theor. Phys. U.S.S.R., 18, 995 (1948).
- (38) MARIANI F., Ann. Geofis., in corso di stampa.
- (39) APPLETON E. V., Quart. J. R. Met. Soc., 65, 324 (1939).
- (40) APPLETON E. V., BEYNON W. J. G., Proc. Phys. Soc., 59, 58 (1947).
- (41) BOOKER H. G., SEATON S. L., Phys. Rev., 57, 87 (1940).
- (42) FUCHS J., Met. Z. 53, 41 (1936).
- (43) GUHA U. C., J. Geophys. Res., 54, 355 (1949).
- (44) JONES M. W., Trans. Amer. Geophys. Un., 31, 187 (1950).
- (45) JONES M. W., JONES J. G., J. Met., 7, 14 (1950).
- (46) KELLOGG W. W., «The upper Atmosphere» (1950).
- (47) NICOLET M., Relations entre les phenomenes solaires et geophysiques, colloques internationaux, Sept. 1947 (1948).
- (48) PEKERIS C. L., Terr. Mag. Atm. Elec., 45, 205 (1940).
- (49) PIERCE J. A., Phys. Rev. 71, 698 (1947).
- (50) RYDBECK O. E. H., Trans. Chalmers Univ. Tech. Gothenburg n. 3, 62 (1942).
- (51) RYDBECK O. E. H., ibidem, n. 34, 149 (1944).
- (52) RANZI I., Alta Frequenza 22, 59 (1953).
- (53) MARIANI F., Ann. Geofis. 8, 51 (1955).
- (54) SHINN D. H.-WHALE H. A., J. Atm. Terr. Phys. 2, 85 (1952).
- (55) KELSO J. M., J. Atm. Terr. Phys. 5, 11 (1954).