

Variazioni stagionali e non stagionali della densità elettronica ionosferica

F. MARIANI

INTRODUZIONE.

Nello studio dell'andamento temporale della densità elettronica nella ionosfera un posto assai importante è occupato dal problema della variazione di periodo 12 mesi ben evidente nei dati sperimentali. La prima e più semplice risposta che si è data al problema è stata di attribuire tale variazione all'alternarsi della vicenda stagionale: come immediata conseguenza di ciò risulterebbe uno sfasamento di 6 mesi nell'andamento delle densità elettroniche osservate nell'emisfero Nord e nell'emisfero Sud; in effetti se ciò è sostanzialmente verificato nel caso degli strati E ed F_1 non altrettanto può dirsi per lo strato F_2 . Vari autori ⁽¹⁾ ⁽²⁾ per interpretare il comportamento di f_oF_2 hanno dovuto supporre l'esistenza di una variazione « annuale » pure di periodo 12 mesi ma in identica fase nei due emisferi e di ampiezza sensibilmente indipendente dal ciclo delle macchie solari. In pratica i risultati di Berkner e Wells e di Eckersley sono essenzialmente basati sull'analisi dei dati ionosferici osservati (a mezzogiorno) a Washington e a Watheroo per un periodo di circa 3 anni (1935-1937).

In effetti le ulteriori conoscenze da allora acquisite sulla struttura dello strato F_2 e la scarsità dei dati da essi analizzati, relativi a due soli Osservatori, diversi per latitudine geografica (oltre che per longitudine) e per latitudine magnetica, inducono a rivedere l'intera questione: oggi le osservazioni ionosferiche sono effettuate in gran numero di Osservatori e si estendono a periodi di tempo assai più lunghi, e pertanto appare utile riconsiderare in modo approfondito e siste-

matico e, per quanto possibile, conclusivo il problema delle variazioni stagionali e non stagionali della densità elettronica negli strati ionosferici, con particolare riguardo allo strato F_2 .

Paragrafo 1. Dati sperimentali e loro metodo di analisi.

Per quanto riguarda i dati ionosferici ci siamo serviti dei valori mediani mensili raccolti dal National Bureau of Standards di Washington negli « Ionospheric data », limitandoci a quelli relativi alle ore 00 e 12 (locali) per ciascun Osservatorio. Gli Osservatori che abbiamo scelto sono elencati nella tabella 1 nella quale sono pure riportati i valori (arrotondati) delle coordinate geomagnetiche, dell'inclinazione magnetica misurata al suolo e delle coordinate geografiche; la scelta degli Osservatori è stata fatta in base al criterio della continuità (oltreché della bontà) dei dati onde garantire al massimo l'attendibilità dei risultati; in due soli casi (Canberra e Washington) si ha, in tutto il periodo di tempo considerato, un numero abbastanza rilevante di valori mancanti, che peraltro nel caso di Washington, trattandosi dello strato F_1 , è stato possibile interpolare senza troppo margine di errore.

L'uso di valori mediani ci è parso preferibile a quello di valori medi, oltreché per ovvie ragioni pratiche, per il fatto che ciò che prima d'ogni altra cosa interessa è l'andamento « normale » non perturbato della ionosfera, che meglio appare appunto dai valori mediani. In quanto al metodo di analisi ci è parso inapplicabile allo strato F_2 il metodo usato da Berkner e Wells, essen-

Tabella 1

Osservatorio	Coordinate geomagnetiche		Inclinazione magnetica	Coordinate geografiche		Epoca iniziale	Valori interpolati		
	Lat.	Long.		Lat.	Long.		$f_o F_2$ ora \rightarrow \downarrow 12 00	$f_o F_1$	$f_o E$
Resolute Bay	83 N	289 E	85 N	74.7 N	94.9 O	1-1953	—	—	—
Reykjavik	70 »	71 »	76 »	64.1 »	22 »	1-1953	—	—	—
Point Barrow	68 »	241 »	80.5 »	71.1 »	156.4 »	1-1953	3	—	—
Anchorage	61 »	288 »	73 »	61.2 »	149.8 »	1-1953	—	—	—
Lindau	53 »	94 »	66.5 »	51.6 »	10.1 E	12-1947	3	3	3
Friburgo	50 »	90 »	64 »	48.1 »	7.8 »	1-1947	1	1	—
Washington	50 »	350 »	71.5 »	39 »	77.5 O	12-1947	—	—	—
San Francisco	44 »	298 »	62.5 »	37.4 »	122.2 »	11-1947	—	—	—
White Sands	42 »	317 »	62 »	32.6 »	106.5 »	11-1947	—	—	—
Baton Rouge	41 »	334 »	63 »	30.5 »	91.2 »	11-1947	—	—	—
Wakkanai	35 »	206 »	60 »	45.4 »	141.7 E	2-1948	1	1	2
Tokyo	26 »	206 »	49.5 »	35.7 »	139.9 »	10-1947	—	—	—
Yamagawa	21 »	197 »	45 »	31.2 »	130.6 »	10-1947	—	—	—
Mani	21 »	267 »	38 »	20.8 »	156.5 O	11-1947	—	—	2
Delhi	19 »	139 »	43.5 »	28.6 »	77.1 E	7-1947	1	—	—
Bombay	10 »	144 »	26 »	19 »	73 »	7-1947	—	—	—
Madras	4 »	150 »	11 »	13.1 »	80 »	7-1947	—	—	—
Guam	3 »	212 »	14 »	13.5 »	144.9 »	1-1953	—	—	—
Huancayo	0.6 S	353 E	4 N	12 S	75.3 O	7-1947	—	—	—
Leopoldville	3 »	83 »	33.5 S	4.4 »	15.2 E	1-1953	—	—	—
Singapore	10 »	173 »	16 »	1.3 N	103.8 »	1-1953	—	—	—
Rarotonga	21 »	274 »	38.5 »	21.3 S	159.8 O	8-1947	2	2	1
Johannesburg	27 »	91 »	62.5 »	26.2 »	28 E	10-1947	1	1	2
Brisbane	36 »	227 »	57 »	27.5 »	153 »	9-1947	—	—	2
Watheroo	41 »	185 »	64 »	30.3 »	115.9 »	10-1947	2	2	2
Canberra	44 »	225 »	65 »	35.3 »	149 »	9-1947	7	7	2
Christchurch	48 »	248 »	68.5 »	43.6 »	172.7 »	10-1947	1	1	2
Hobart	52 »	224 »	72 »	42.8 »	147.4 »	9-1947	1	1	5
Deception	52 »	7 »	56.5 »	63 »	60.5 O	1-1953	3	3	—
Port Lockroy	53 »	4 »	58 »	64.9 »	63.5 »	1-1953	—	—	—

Tabella 2

Schema	Coefficienti							Residui percentuali di onde con periodo													
	$2a_0$	a_{-1}	a_{-2}	a_{-3}	a_{-4}	a_{-6}	a_{-8}	2	3	4	5	6	8	10	12	16	20	24	32	64	∞
A	$1/6$	$1/6$	$1/8$	$1/12$	$1/24$			0	0	0	- 4	0	20	40	54	71	80	86	91	96	100
B	$1/4$				$-1/4$		$1/8$	0	37	0	-11	37	100	73	37	0	-11	-12	-10	- 4	0
C	$1/6$		$1/6$		$1/8$	$1/12$	$1/24$	100	0	0	- 4	0	0	- 4	0	20	40	54	71	91	100

zialmente basato sull'uso di sviluppi in serie doppia di Fourier, rispetto alle variabili tempo e latitudine geografica, delle densità elettroniche massime in quanto, essendo lo strato fortemente soggetto al controllo del campo magnetico terrestre occorrerebbe anche prendere in considerazione per lo meno la latitudine magnetica; ma in tal caso non sarebbero più consentite le semplificazioni determinate dalla considerazione di coppie di Osservatori ubicati simmetricamente rispetto all'equatore geografico, come appunto è stato possibile ai predetti autori.

In effetti, tenuto conto che la parte preponderante delle variazioni sia stagionali sia non stagionali di densità elettronica mostra periodo 12 mesi, abbiamo usato il metodo di analisi periodale di Vercelli (3), allo scopo di isolare la componente periodica di periodo 12 mesi nell'andamento temporale dei dati sperimentali: dalle successioni delle frequenze critiche desunte dagli « Ionospheric data », abbiamo dedotto quelle di $(f_o F_2)^2$, $(f_o F_1)^4$ e $(f_c E)^4$; tali quantità, che d'ora in poi indicheremo con N , allorchè ci si riferisca alle ore 12 e si assumano come ipotesi la stazionarietà dell'equilibrio ioni-elettroni e quali processi di scomparsa degli elettroni l'attaccamento per lo strato F_2 e la ricombinazione per gli strati F_1 ed E , risultano approssimativamente proporzionali alle intensità di ionizzazione.

Il metodo di analisi adottato, più lungo ad applicarsi di quello adottato da Berkner, ci consente di isolare in grandezza e fase l'onda di periodo 12 mesi, che d'ora in poi

indicheremo con N_{12} . Senza entrare nei dettagli del metodo, per i quali rinviamo senz'altro ai lavori di Vercelli, qui diremo solo che, sostituendo a ciascun valore delle successioni dei valori mediani mensili di N una combinazione lineare simmetrica con opportuni coefficienti dei valori a destra e a sinistra di quello prescelto, abbiamo formato dapprima (mediante la combinazione A di tabella 2) le corrispondenti successioni perquate e quindi, da queste, le successioni costituenti la componente N_{12} (mediante la combinazione B) e l'andamento medio o secolare (mediante la combinazione C). Conviene rilevare che la selezione operata sui dati lascia nella componente N_{12} , con ampiezza confrontabile a quella dell'onda sinusoidale di periodo 12 mesi, le onde sinusoidali di periodo 8 e 10 mesi, le quali però sono presumibilmente nulle o trascurabili per ragioni di carattere fisico, tranne eventualmente qualche caso eccezionale. In effetti la N_{12} è risultata sostanzialmente composta dalla sola onda sinusoidale di periodo 12 mesi: sola eccezione l'andamento di N_{12} alle ore 12 a Delhi che mostra una periodicità di circa 8 mesi. Nel seguito sarà pertanto giustificato assumere la N_{12} come contenente la sola periodicità di 12 mesi.

Paragrafo 2. Andamento della componente N_{12} nello strato F_2 .

I risultati della analisi dei dati sperimentali sono graficati nelle figg. 1 e 2, che danno gli andamenti di N_{12} rispettivamente alle ore 12 e alle 00.

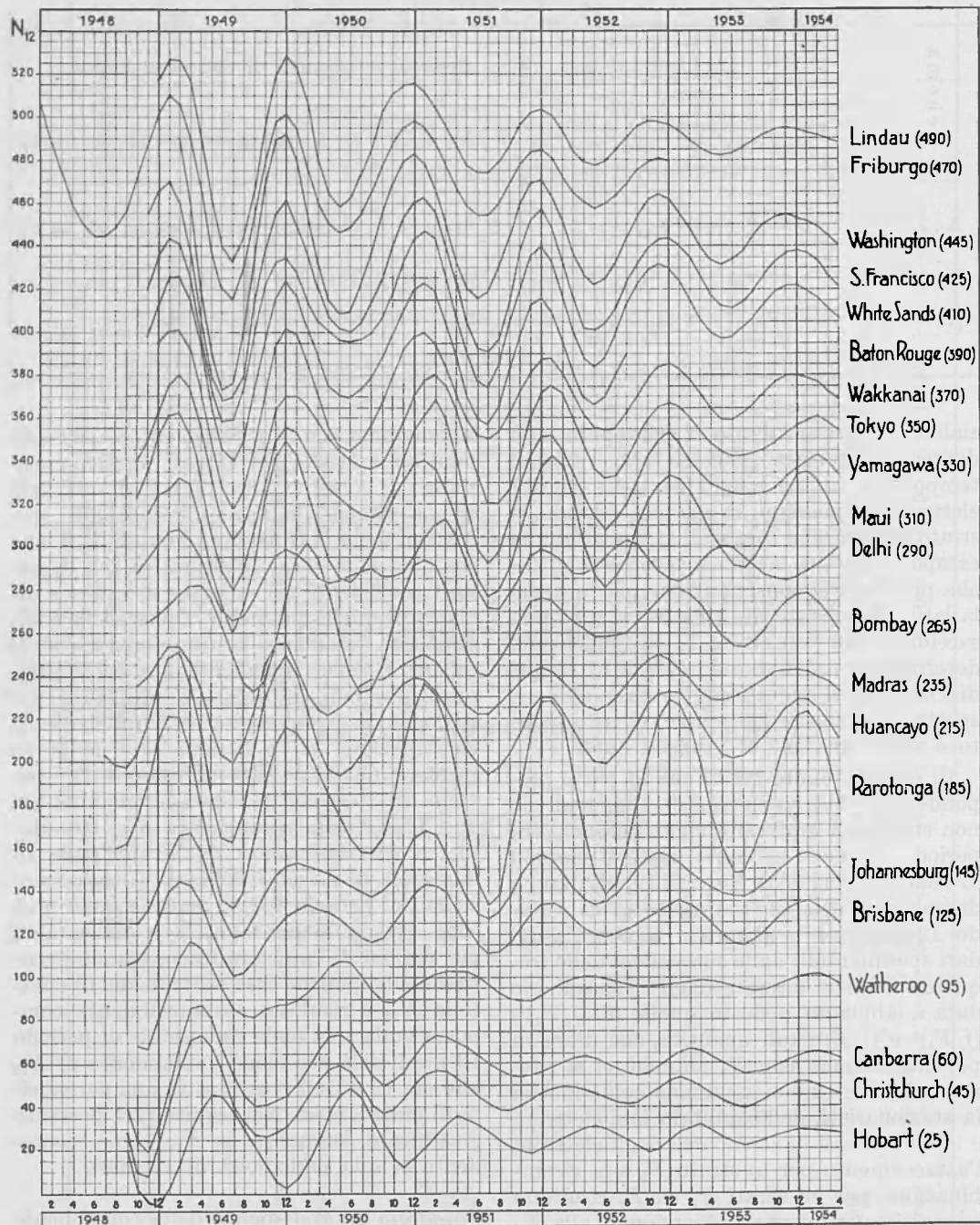


Fig. 1. - Andamento di N_{12} nello strato F_2 , a mezzogiorno. In questa e nelle successive fig. 2, 3, 4, 5, 8 i mesi da Gennaio a Dicembre sono numerati da 1 a 12; in questa e nelle successive fig. 2 e 3 i numeri tra parentesi accanto ai nomi degli Osservatori indicano l'ordinata cui corrisponde lo zero di ciascun grafico.

I vari grafici sono ordinati secondo la latitudine geomagnetica di ciascun Osservatorio. Dall'esame degli andamenti di N_{12} alle ore 12 (fig. 1) si deducono immediatamente, ove si eccettui l'Osservatorio di Delhi di cui si è già detto al paragr. 1, le seguenti notevoli caratteristiche:

1. - L'ampiezza di N_{12} è, a parità di latitudine, nettamente maggiore nell'emisfero Nord che nell'emisfero Sud (fatta eccezione per il caso di Maui).

2. - Nell'emisfero Nord, le epoche di massimo e di minimo tendono leggermente ad anticipare passando dal periodo di alta attività a quello di bassa attività solare e passando da latitudini più basse a latitudini più alte.

3. - Nell'emisfero Sud, fino alla latitudine di Brisbane, gli andamenti di N_{12} sono sostanzialmente in fase con quelli dell'emisfero Nord; a latitudini Sud maggiori si manifesta, nel periodo in cui è notevole l'attività solare cioè fin verso il 1952, una graduale tendenza dell'epoca di massimo e di minimo a posticipare al crescere della latitudine: alla latitudine di Hobart non si raggiunge ancora la completa opposizione di fase rispetto all'emisfero Nord; peraltro, nel successivo periodo di minima attività solare, la fase di N_{12} appare sensibilmente uguale nei due emisferi.

4. - In generale la N_{12} va decrescendo al diminuire della attività solare; tra le latitudini geografiche di S. Francisco e di

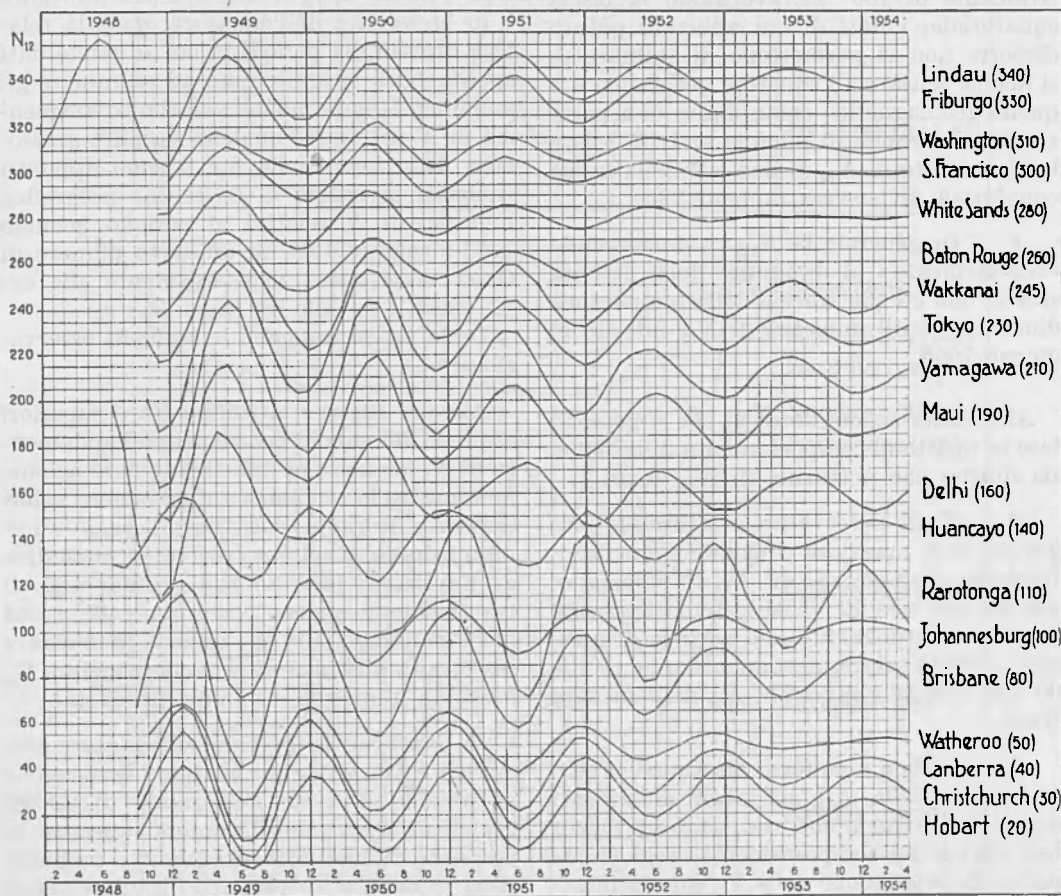


Fig. 2. - Andamento di N_{12} nello strato F_2 , a mezzanotte.

Brisbane, eccezion fatta per l'Osservatorio di Bombay, si nota una temporanea sensibile diminuzione di ampiezza in un periodo centrato intorno al giugno 1950.

In quanto agli andamenti di N_{12} alle 00 (fig. 2) si deducono le seguenti caratteristiche:

5. - L'ampiezza di N_{12} , a parità di latitudine, è, con poche eccezioni, sensibilmente uguale nei due emisferi.

6. - Le epoche di massimo e di minimo tendono leggermente a posticipare passando dal periodo di alta attività al periodo di bassa attività solare nell'emisfero Nord; ad anticipare nell'emisfero Sud.

7. - La fase di N_{12} cambia approssimativamente di 180° attraversando la fascia equatoriale; i dati di cui abbiamo potuto disporre non ci permettono di stabilire se si debba pensare all'equatore geografico o a quello geomagnetico come limite di separazione; nel periodo di minima attività solare lo sfasamento di N_{12} ai due lati della fascia equatoriale diviene esattamente 180° .

8. - In generale la N_{12} va decrescendo « regolarmente » al diminuire della attività solare; non c'è più traccia della temporanea diminuzione di ampiezza di N_{12} intorno al giugno 1950.

Altre osservazioni notevoli che si possono fare in merito al comportamento di insieme, sia diurno che notturno, di N_{12} sono:

9. - Negli Osservatori a latitudine magnetica Sud maggiore o uguale a quella di Brisbane l'ampiezza di N_{12} è maggiore alle 00 che alle 12 quasi sistematicamente tranne, eventualmente, nel periodo di massima attività solare; nettamente minore alle 00 che alle 12 è invece la N_{12} nell'emisfero Nord.

10. - È ben manifesto un controllo geomagnetico della N_{12} sia negli andamenti diurni che in quelli notturni; sono tra l'altro ben visibili dei comportamenti « regionali »; per es. la depressione della N_{12} alle 12 intorno al giugno 1950, la sua notevole attenuazione alle 00 negli Osservatori di Washington,

San Francisco e White Sands in tutto il periodo di tempo esaminato, i cui grafici appaiono « irregolarmente » distribuiti disponendoli in ordine di latitudine geografica.

11. - Nell'Osservatorio di Rarotonga la N_{12} ha ampiezza nettamente maggiore che a Huancayo e a Johannesburg, laddove nell'Osservatorio di Maui situato a latitudini geografica e geomagnetica simmetriche di quelle di Rarotonga l'ampiezza della N_{12} non appare sensibilmente diversa che a Yamagawa e a Bombay (alle ore 12) o a Yamagawa e a Delhi (ore 00).

A complemento dell'analisi dei dati sperimentali fatta sopra, può essere interessante avere qualche ulteriore informazione relativa a Osservatori situati alle alte latitudini o in prossimità dell'equatore: data la relativa brevità dei periodi in cui si hanno dati sperimentali ci limiteremo ad esaminare gli andamenti temporali dei valori mediani mensili di N per trarre qualche sia pure grossolana deduzione: nella fig. 3 sono appunto riportati in ordine di latitudine geografica i grafici di N relativi al periodo gennaio 1953-dicembre 1955 in un certo numero di Osservatori tipici, rispettivamente alle ore 12 (caso A) e alle 00 (caso B).

Dalla fig. si traggono le seguenti osservazioni:

Alle ore 12: a) a latitudini Nord superiori a quelle del circolo polare artico l'andamento di N , anche se di difficile interpretazione, non mostra la tendenza a raggiungere valori massimi intorno al solstizio invernale e minimi intorno al solstizio estivo; la latitudine di Reykjavik (64° N) può considerarsi di transizione in quanto pochi gradi più a Sud (ad Anchorage, 61° N) appare in maniera distinta la presenza di una componente N_{12} massima d'inverno e minima in estate;

b) a latitudini prossime all'equatore geografico è ben evidente la tipica oscillazione di periodo 6 mesi: l'alternarsi di minimi principali e secondari sembra suggerire la presenza di una componente N_{12} massima circa intorno al solstizio di dicembre, negli Osservatori di Guam e di Leopoldville, mentre nell'Osservatorio di Singapore, il mas-

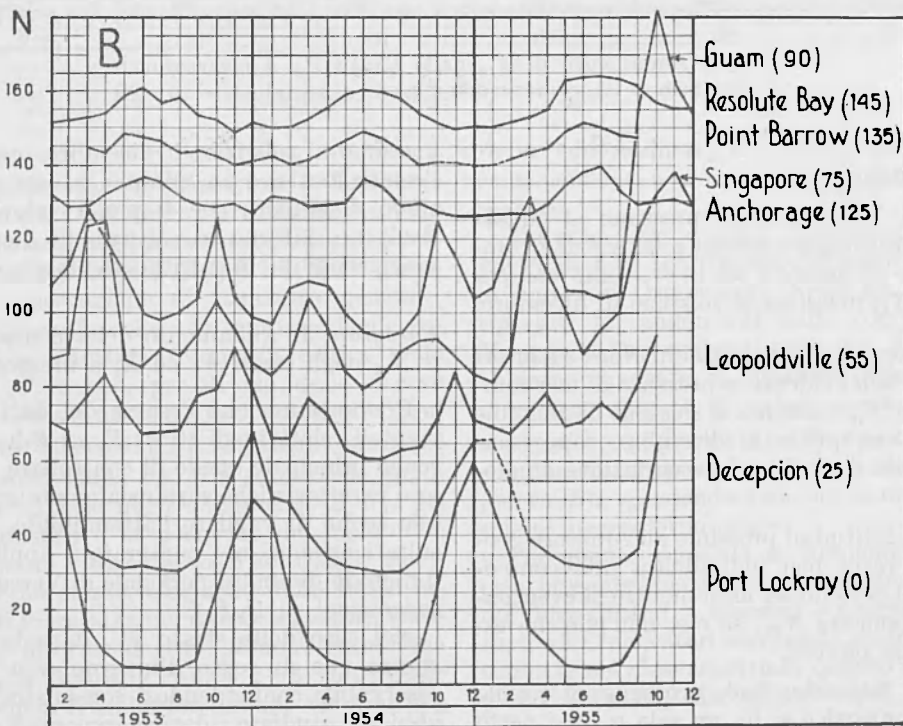
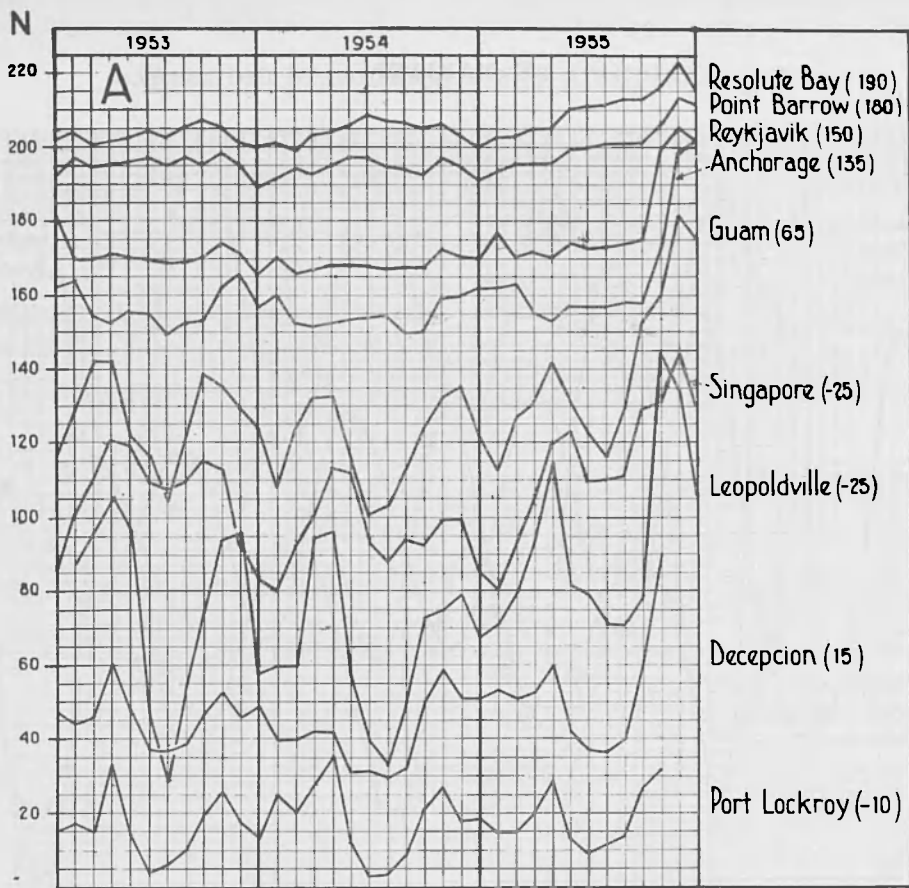


Fig. 3. - Andamento di N nello strato F_2 , a mezzogiorno (caso A) e a mezzanotte (caso B). I tratti interpolati sono tratteggiati.

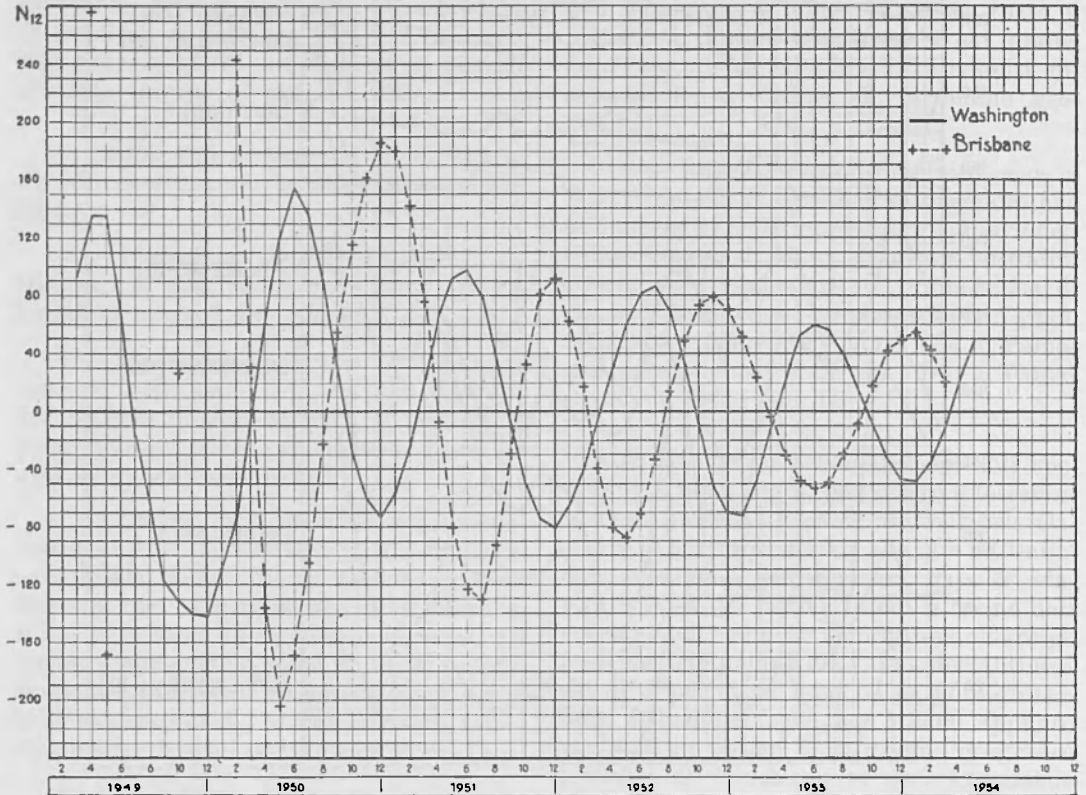


Fig. 4. - Andamento di N_{12} nello strato F_1 , a mezzogiorno.

simo della eventuale N_{12} sembrerebbe cadere al solstizio di giugno;

e) a latitudini Sud prossime al circolo polare antartico è ancora presente una componente di periodo sei mesi e una componente N_{12} massima al solstizio di dicembre.

Alle ore 00: d) a latitudini Nord superiori ai 60° è ben evidente la presenza di una componente N_{12} massima al solstizio di giugno e minima in quello di dicembre, rappresentante cioè la « normale » variazione stagionale;

e) a latitudini prossime all'equatore geografico resta ben individuata una componente di periodo sei mesi mentre la eventuale componente N_{12} , se c'è, non può che essere assai piccola;

f) a latitudini Sud prossime al circolo polare antartico si ha un solo e assai netto

massimo al solstizio di dicembre, cioè nell'estate locale, e un minimo intorno al solstizio di giugno; per di più, i valori di N risultano, intorno al solstizio di dicembre, maggiori di quelli corrispondenti alle ore 12.

Paragrafo 3. Andamento della componente N_{12} negli strati F_1 ed E , a mezzogiorno.

Premettiamo che l'esame dei dati sperimentali relativi agli strati F_1 ed E ha come scopo principale quello di controllare talune loro caratteristiche sostanzialmente già note allo scopo di vagliare l'attendibilità dei risultati ottenuti nel paragrafo 2 applicando il metodo di analisi periodale di Vercelli alle successioni di $(f_o F_2)^2$.

Nel caso dello strato F_1 , data la circostanza che di solito d'inverno esso non è osservabile confondendosi con lo strato F_2 , abbiamo studiato i dati sperimentali di due

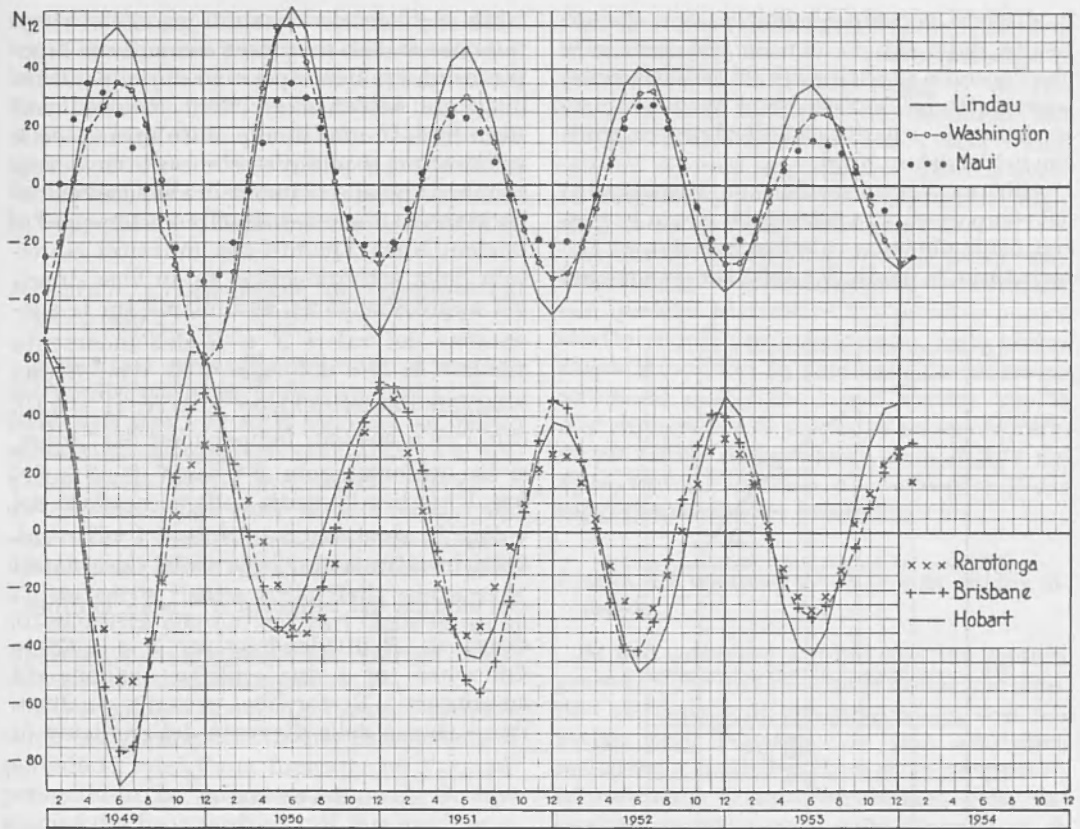


Fig. 5. - Andamento di N_{12} nello strato E , a mezzogiorno.

solli Osservatori (Washington e Brisbane) che, sia pure con vari valori mancanti, hanno una successione pressochè continua di valori mediani mensili di $f_o F_1$. D'altra parte, quale osservazione di carattere generale, conviene notare che non sempre è facile valutare la effettiva frequenza critica dello strato F_1 e che, per di più, delle riserve sono state avanzate da vari autori (*) (**) sul significato fisico di $f_o F_1$. Appaiono comunque confermate dalla fig. 4 la sostanziale opposizione di fase negli andamenti di N_{12} nei due emisferi e la posizione dei massimi e dei minimi intorno ai mesi solstiziali; quanto alle ampiezze, esse sono dello stesso ordine di grandezza nei due Osservatori, tranne che intorno al 1949 allorchè l'ampiezza di N_{12} a Brisbane risulta 2-3 volte maggiore che a Washington (alcuni valori di N_{12} a Brisbane, non appaiono nella fig. perchè

corrispondenti a ordinate non contenute nel grafico).

Nel caso dello strato E le successioni dei valori di $f_o E$ sono pressochè continue in numerosi Osservatori. Nella fig. 5 sono riportati gli andamenti della componente N_{12} per 6 Osservatori; nella fig. 6 invece abbiamo riportato, in funzione della latitudine geografica λ , il valore medio annuo $\cos \chi_o$ di $\cos \chi_o$ (curva A) e l'ampiezza della componente di periodo 12 mesi del $\cos \chi_o$ (curva B), χ_o essendo l'angolo zenitale del sole al mezzogiorno locale.

Per quanto riguarda la componente N_{12} essa presenta una netta opposizione di fase nei due emisferi: i massimi e i minimi, per tutti gli Osservatori analizzati, cadono nettamente nei mesi solstiziali; quanto alle ampiezze della N_{12} esse crescono più o meno sistematicamente al crescere della latitudine

in discreto accordo qualitativo con quanto risulta dalla fig. 6: non si può però dire che l'accordo quantitativo sia soddisfacente, soprattutto nell'emisfero Sud ove le ampiezze risultano, a parità di latitudine, maggiori che nell'emisfero Nord.

Abbiamo voluto studiare un altro aspetto del comportamento fisico dello strato *E*: precisamente abbiamo valutato, per ciascun Osservatorio, la media *N** della successione dei

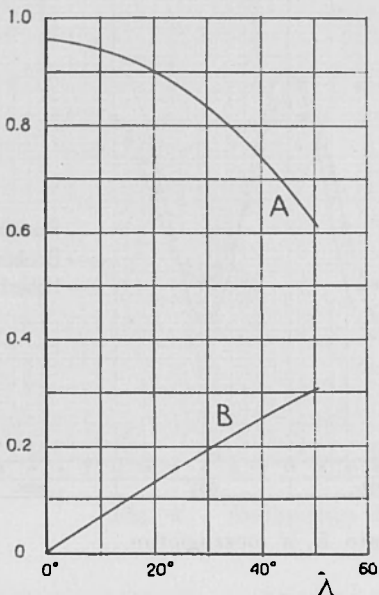


Fig. 6.

valori mensili \bar{N} dell'asse medio di $(f_o E)^4$ alle 12 nel periodo gennaio 1950-dicembre 1953, che abbiamo confrontata con i valori di $\overline{\cos \chi_o}$. I rapporti $N^*/\overline{\cos \chi_o}$, indicati nella tabella 3, appaiono approssimativamente costanti al variare della latitudine: le loro differenze vanno attribuite, a nostro avviso, a più o meno lievi differenze locali del gradiente di temperatura *q*; come pure, eventualmente, a variazioni locali nella dipendenza della intensità di ionizzazione dalla attività solare; quanto al primo punto risulta (6) che la intensità di ionizzazione alla quota di massima intensità elettronica è proporzionale a $(\cos \chi)^{1 + \frac{kq}{mg}}$ ove *m* è la massa dell'elettrone, *k* la costante di Boltz-

mann e *g* l'accelerazione di gravità: i risultati della tabella sembrano coerenti con l'ipotesi di un gradiente positivo di temperatura maggiore nell'emisfero Nord che nell'emisfero Sud; in effetti, allo stato attuale delle conoscenze, si può dire che esiste una certa asimmetria delle temperature al suolo essendo in media l'emisfero Sud più caldo che l'emisfero Nord. Quanto alla influenza esercitata dalla attività solare, se, in linea di prima approssimazione, assumiamo tra la successione dei valori *N* e *R* dell'andamento secolare di *N* e del numero di Wolf *R* una relazione lineare del tipo $N = N_o [1 + \alpha R]$, con *N*_o e α costanti indipendenti dal tempo, si ha evidentemente $N^* = N_o [1 + \alpha R^*]$ ove *R** indica la media della successione dei valori *R*; se si assumono per α i valori dedotti in altra nota (?) per i vari Osservatori e si elimina dal rapporto $N^*/\overline{\cos \chi_o}$ la dipendenza da \bar{R} dividendolo per $1 + \alpha R^*$ le differenze tra i due emisferi tendono ad accentuarsi. Resterebbe pertanto esaltata l'importanza della diversità del gradiente di

Tabella 3

Osservatorio	<i>N*</i>	$N^*/\overline{\cos \chi_o}$
Lindau	84.5	145.8
Washington	113.6	153.7
Tokyo	127.5	163.7
White Sands	133.7	165.4
Maui	150	168.7
Rarotonga	154.5	173.7
Johannesburg	158.9	184.6
Brisbane	155.4	182.9
Watheroo	122.8	150.4
Canberra	130.5	166.2
Hobart	118.6	167.9
Christchurch	106.9	133.7

temperatura per l'interpretazione delle differenze locali tra le previsioni della teoria della fotoionizzazione e i risultati sperimentali. Tale problema tuttavia esula dai limiti che ci siamo imposti in questa nota; esso rimane aperto per quando saranno note maggiori informazioni sulla distribuzione geografica delle temperature alle quote intorno ai 100 km.

Paragrafo 4. Discussione dei risultati del paragrafo 2.

I risultati ottenuti applicando il metodo dell'analisi periodale ai dati sperimentali relativi agli strati F_1 ed E sono nel complesso sufficientemente regolari e concordi con le previsioni della teoria, così da far ritenere il metodo ben applicabile ai dati relativi allo strato F_2 : i risultati del paragrafo 2 hanno pertanto un effettivo significato fisico come, d'altra parte, risulta anche dalla sostanziale sistematicità con cui nei vari Osservatori si riproducono e gradualmente variano le caratteristiche della componente N_{12} .

Nel seguito, a fine di discussione, assumeremo la N_{12} composta di due componenti di periodo 12 mesi, l'una, indicata con N_{12}^s , rappresentante la variazione normale di tipo stagionale, in opposizione di fase negli emisferi Nord e Sud, e l'altra, indicata con N_{12}^a , rappresentante la parte principale, sinusoidale, della presunta variazione di tipo non stagionale, in ugual fase nei due emisferi, supposta da Berkner e Wells. Per la componente stagionale N_{12}^s considereremo nella discussione, per maggiore generalità, i due casi che essa sia maggiore d'estate che d'inverno (come dovrebbe aversi qualora valesse la teoria classica di Chapman) oppure che sia minore d'estate e maggiore d'inverno (come si ottiene per es. con certi schemi in cui si assume una diminuzione con la quota del coefficiente di ricombinazione ioni-elettroni).

In considerazione del fatto che la N_{12}^s raggiunge i suoi valori estremi nei mesi solstiziali e che i massimi e i minimi dell'andamento della componente N_{12} sono pure centrati intorno ai mesi solstiziali, tranne la tendenza che hanno, a latitudini prossime a quelle di Hobart nei mesi solstiziali e durante il periodo di maggiore attività solare, a subire una progressiva variazione di

fase al crescere della latitudine Sud (tendenza che peraltro non sembrerebbe presente in Osservatori a latitudini maggiori di Hobart), si può fondatamente assumere che la N_{12}^a raggiunge anch'essa i suoi valori estremi nei mesi solstiziali con qualche eventuale spostamento di entità dipendente dalla attività solare, dalla latitudine, ecc.

A priori la componente N_{12}^a potrà ritenersi di origine siderale oppure determinata, con qualche particolare ma peraltro poco o affatto conosciuto meccanismo, nella nostra stessa atmosfera. In ogni caso già un esame sommario delle figg. 1 e 2 mostra che la N_{12}^a deve essere di ampiezza pressochè dello stesso ordine di grandezza della N_{12}^s ; e del resto anche i risultati di Berkner e Wells suggeriscono questa possibilità.

I caso. La componente N_{12}^a è di origine siderale.

Si può osservare a priori che non sembra probabile che una eventuale radiazione siderale sia capace di produrre effetti così notevoli: però l'ipotesi non può senz'altro escludersi e, d'altra parte, è stata espressa (2) la possibilità di una correlazione della variazione annuale con il cosiddetto rumore di Jansky (3).

Per quanto più sopra si è detto in merito alla posizione dei massimi e dei minimi di N_{12}^a , se la radiazione siderale proviene in una ben determinata direzione da una sorgente localizzata, tale direzione dovrà approssimativamente corrispondere a una ascensione retta di 6^h o di 18^h (v. fig. 7); supporremo per semplicità, in un primo momento, che la declinazione della sorgente sia intorno a 0° (è in sostanza il caso del rumore di Jansky, la cui sorgente, indicata con \times nella fig., sembra avere una declinazione di circa -10°).

Se l'ascensione retta fosse 6^h la radiazione risulterebbe massima, nell'emisfero Nord, a mezzogiorno durante l'estate e a mezzanotte durante l'inverno; viceversa se l'ascensione fosse 18^h . Naturalmente la intensità ricevuta sulla Terra dipenderebbe dalla effettiva declinazione della sorgente e dal luogo di osservazione.

Nel complesso un'esame delle fig. 1 e 2 potrebbe suggerire un accordo di fase a mez-

zanotte tra le componenti N_{12}^s e N_{12}^a . Ciò porterebbe a localizzare la sorgente intorno ad ascensione retta di 6^h : esaminiamo più dettagliatamente tale possibilità: nella fig. 8 le linee continue rappresentano l'andamento di N_{12}^s e le linee tratteggiate quella di N_{12}^a (arbitrariamente scelta con ampiezza pari alla metà di quella di N_{12}^s).

Alle 00 potrebbero allora valere i casi A' e B' , rispettivamente nell'emisfero Nord e Sud: risulterebbero allora una maggiore

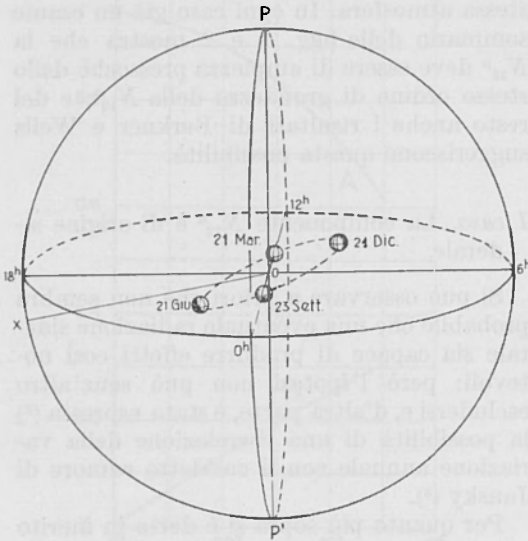


Fig. 7. — Sfera celeste e posizione della Terra: O è il sole, P e P' i poli celesti.

ampiezza di N_{12}^a a Sud che a Nord e un'opposizione di fase dalle due parti della fascia equatoriale; scomparirebbe così la approssimativa simmetria di ampiezza nei due emisferi. Quanto al comportamento di N_{12} alle 12, essa risulterebbe effettivamente più grande nell'emisfero Nord (caso A) che nell'emisfero Sud (caso B) ma sarebbero errate le fasi per l'emisfero Nord, in contrasto netto con gli andamenti sperimentali di N_{12} . Con tanto maggior ragione, contrastano con l'esperienza le eventualità rappresentate rispettivamente nell'emisfero Nord e Sud dai casi C' (ore 00), C (ore 12) e D' (ore 00), D (ore 12).

Non è difficile convincersi, tenendo sempre presente la fig. 8, come più contrastante con i fatti sperimentali risulti l'ipotesi che

la ascensione retta della eventuale sorgente sia di 18^h ; infatti a mezzogiorno, nell'emisfero Nord, non potrebbe che valere il caso C' ma allora nell'emisfero Sud sarebbe errata almeno fino alla latitudine di Brisbane, la fase di N_{12} e, per di più, di notte, l'andamento di N_{12} avrebbe fase sbagliata in ambedue gli emisferi e ampiezze diverse, a parità di latitudine Sud e Nord.

Ad analoghe conclusioni negative si giungerebbe assumendo per la componente siderale ampiezza maggiore che per la componente stagionale perchè allora in ogni caso la N_{12} risulterebbe in fase in ambedue gli emisferi sia alle 00 che alle 12; e così pure si giungerebbe a conclusioni negative se assumessimo per la N_{12}^s ampiezza maggiore alle 12 che alle 00.

Se da ultimo lasciamo cadere la limitazione a valori prossimi a 0° , posta alla declinazione della eventuale sorgente, ci si convince ancora, con ragionamenti del tutto analoghi a quelli fatti sopra, che in ogni caso si va a cadere in contraddizione con parte dei risultati sperimentali.

In definitiva ci sembra che vada allora esclusa l'eventualità che la componente N_{12}^a sia di origine siderale.

II caso. La componente N_{12}^a è un effetto di origine terrestre.

Se si esclude senz'altro l'effetto « non stagionale » determinato dalla variazione della distanza Terra-Sole (distanza che è minima al solstizio di dicembre e massima in quella di giugno), effetto di periodo 12 mesi, di uguale fase nei due emisferi, ma trascurabile data la sua esiguità (l'irradiazione solare ai due solstizi differisce di solo qualche per cento), non rimane altra possibilità che attribuire la componente N_{12}^a a qualche causa agente nella stessa atmosfera terrestre.

Invero Berkner e Wells cercarono di esaminare l'effetto di possibili cause di effetti non stagionali apparenti tra cui principalmente quelli dovuti a differenze nel rapporto tra temperatura estiva e invernale alle quote interessate, alla sovrapposizione invernale degli strati F_1 e F_2 , alla inhomogeneità dei dati sperimentali giungendo però a conclu-

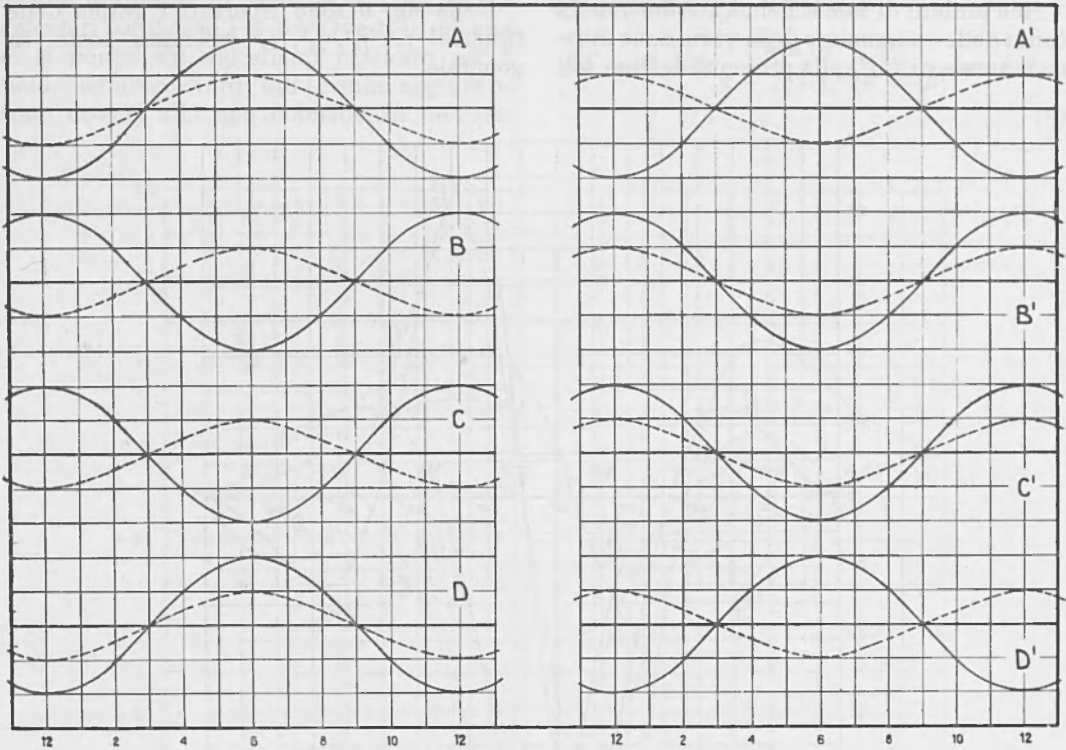


Fig. 8.

sioni favorevoli a un effettivo significato fisico della variazione non stagionale.

Viene allora quasi spontaneo di pensare ai fenomeni di circolazione nell'alta atmosfera e all'effetto provocato su di essi dal campo magnetico terrestre, in conseguenza del quale gli strati ionosferici possono essere soggetti a spostamenti secondo la verticale la cui entità va considerata funzione del posto e dell'ora nonchè della stagione (o forse, meglio e più genericamente, della declinazione solare). In tale ordine di idee è stata elaborata da Martyn (9) la teoria delle maree di cui qui ricordiamo taluni aspetti: se il campo delle velocità dei venti orizzontali associati con le maree atmosferiche è irrotazionale, ammettendo pertanto che la velocità derivi da un potenziale espresso da una serie di armoniche sferiche della forma

$$V = \sum \sum A_n^\sigma Q_n^\sigma \sin [\sigma(\lambda + t) - \alpha_n^\sigma] \quad [1]$$

ove Q_n^σ è l'armonica di ordine σ e grado n , A_n^σ la corrispondente ampiezza, λ è la longitudine, t il tempo riferito a un meridiano fisso e α_n^σ l'angolo di fase, si perviene alla seguente espressione per la velocità di deriva v (drift velocity) lungo la verticale degli elettroni ionosferici

$$v = \frac{\omega^2}{a(v^2 + \omega^2)(4 - 3 \sin^2 \vartheta)} \cdot \sum_{\sigma=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_n^\sigma \left\{ 2 \sigma \left(\cos^2 \vartheta - \frac{\sigma}{n(n+1)} \right) Q_n^\sigma - Q_n^{\sigma+1} \sin 2 \vartheta \right\} \sin [\sigma(\lambda + t) - \alpha_n^\sigma] \quad [2]$$

ove a è il raggio terrestre, ν la frequenza media di collisione tra ioni e molecole o atomi dell'aria, ω la velocità angolare di rotazione della terra, ϑ la colatitudine.

Nell'ambito di tale schema, attribuendo la causa delle « anomalie » della variazione diurna e annua di $f_o F_2$ alla presenza dei due soli

Nella fig. 9 sono riportati i grafici delle funzioni $f_1^1, f_2^1, f_2^2, f_3^3$ essendosi posto, in generale,

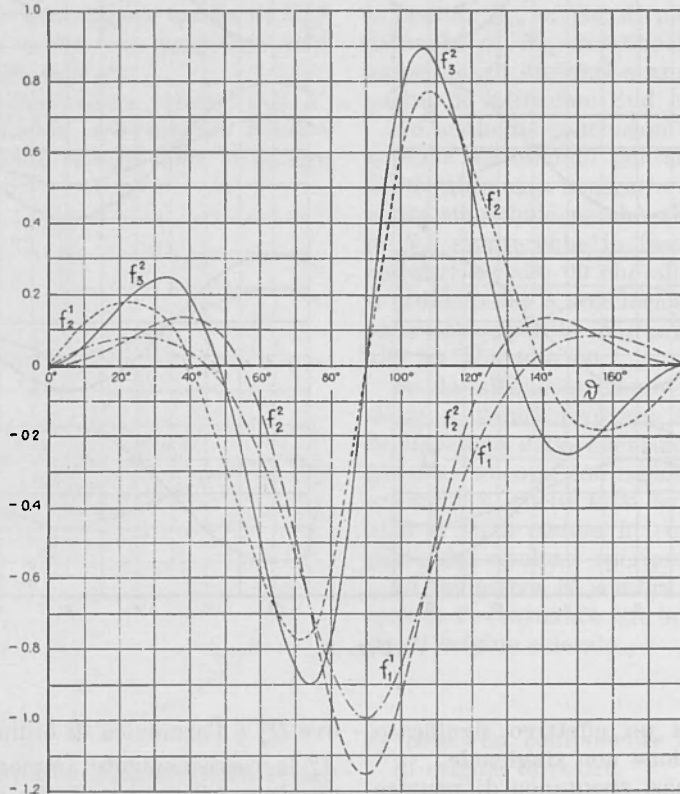


Fig. 9.

termini Q_2^2 e Q_3^3 nella [1], rappresentanti l'uno una variazione semidiurna in accordo di fase nei due emisferi e l'altro una variazione semidiurna di fase opposta e assegnando convenientemente gli angoli di fase α_2^2 e α_3^3 , Martyn ha ritenuto possibile interpretare gli andamenti di $f_o F_2$ negli Osservatori di Cape York, Brisbane, Canberra e Hobart.

Adottando le vedute della teoria di Martyn, può apparire ragionevole almeno a prima vista interpretare i risultati mostrati in questa nota, prendendo in considerazione un ulteriore effetto di periodo 24 ore, determinato dalla presenza nella [1], con ampiezza non trascurabile, di termini del tipo Q_n^1 .

$$f_n^\sigma = \frac{1}{4 - 3 \text{sen}^2 \vartheta} \left[2 \frac{(n - \sigma)!}{(n + \sigma)!} \right]^{1/2} \cdot \left\{ 2 \vartheta \left(\cos^2 \vartheta - \frac{\sigma}{n(n + 1)} \right) Q_n^\sigma - Q_n^{\sigma+1} \text{sen} 2 \vartheta \right\} \quad [3]$$

ove $\left[2 \frac{(n - \sigma)!}{(n + \sigma)!} \right]^{1/2}$, fattore di normalizzazione di Schmidt, permette una grossolana normalizzazione delle varie armoniche; tali funzioni forniscono la legge di variazione della ampiezza di velocità con la colatitudine.

Nella fig. 10 sono invece graficati i termini correttivi $f_1^{1'}, f_2^{1'}, f_2^{2'}, f_3^{2'}$ che vanno aggiun-

ti alle ampiezze di velocità $f_1^1, f_2^1, f_2^2, f_3^2$, calcolati per il caso $\lambda = 68^\circ$ Ovest, in cui cioè ci si ponga sul meridiano passante per il polo magnetico Nord; tali termini aggiuntivi sono dovuti alla non coincidenza dell'asse

già indicate da Martyn e

$$f_1^{1'} = 0.202 \frac{\text{sen}(\vartheta - \Phi)}{4 - 3 \text{sen}^2(\vartheta - \Phi)} \text{sen} 2\vartheta \quad [6]$$

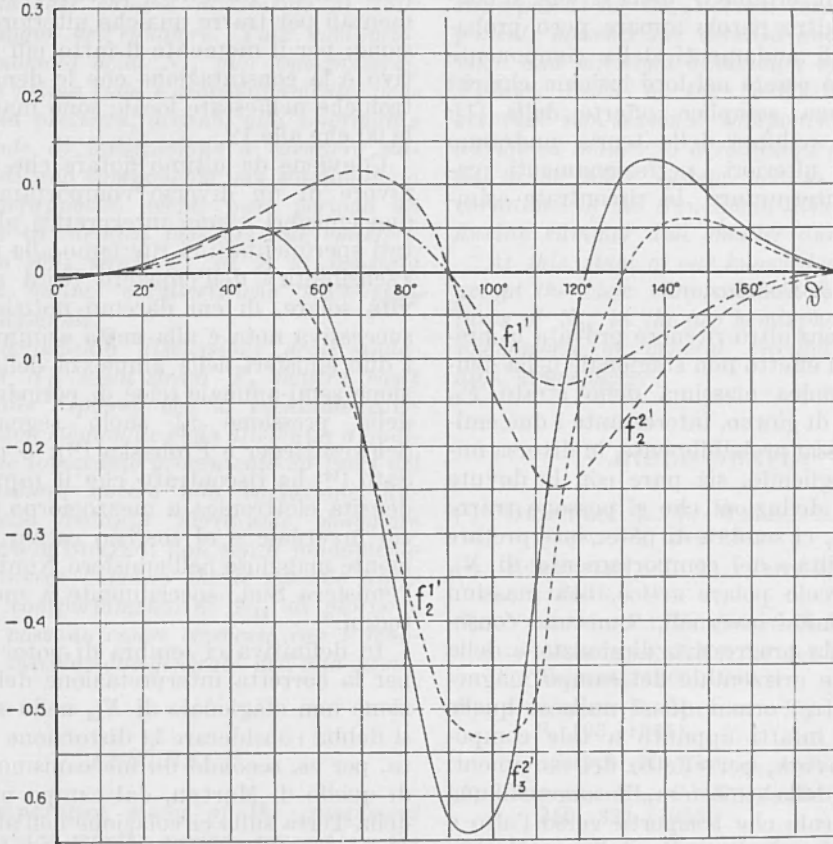


Fig. 10.

del dipolo magnetico terrestre con l'asse geografico; essi, indicando con $\Phi (= 11^\circ 25')$ l'angolo formato dall'asse del dipolo con l'asse geografico, si scrivono rispettivamente nella forma

$$f_2^{2'} = 0.116 \frac{\text{sen}(\vartheta - \Phi)}{4 - 3 \text{sen}^2(\vartheta - \Phi)} \cdot \cos \vartheta (4 - 3 \cos 2\vartheta) \quad [4]$$

$$f_3^{2'} = 0.0326 \frac{\text{sen}(\vartheta - \Phi)}{4 - 3 \text{sen}^2(\vartheta - \Phi)} \left(\frac{9}{4} \text{sen}^2 2\vartheta + 13 \cos 2\vartheta - 9 \cos^2 2\vartheta \right) \quad [5]$$

$$f_2^{1'} = 0.117 \frac{\text{sen}(\vartheta - \Phi)}{4 - 3 \text{sen}^2(\vartheta - \Phi)} \text{sen} \vartheta \cdot (7 - 12 \text{sen}^2 \vartheta) \quad [7]$$

da noi calcolate direttamente a partire dai risultati generali della teoria dinamo di Schuster ⁽¹⁰⁾ e Chapman ⁽¹¹⁾. Come si vede l'entità dei termini correttivi è assai sensibile, e principalmente nel caso delle Q_2^1 e Q_3^2 cioè dei termini « stagionali »; tuttavia l'effetto delle correzioni è essenzialmente quello di spostare il piano di simmetria delle

velocità dal piano equatoriale geografico al piano equatoriale geomagnetico; anzi, questa ultima conclusione vale del tutto in generale, per la forma analitica stessa delle velocità corrispondenti a ciascuna armonica e dei corrispondenti termini correttivi, qualunque sia il termine Q_n^σ della [2] che si consideri; in altre parole appare poco probabile che gli andamenti della componente N_{12} possano essere nel loro insieme chiariti nello schema semplice offerto dalla [1]: nei futuri sviluppi della teoria andranno introdotti ulteriori perfezionamenti capaci di interpretare le riscontrate asimmetrie.

Paragrafo 5. Conclusioni.

Si può senz'altro ritenere provata la presenza di un effetto non stagionale nella densità elettronica massima dello strato F_2 , soprattutto di giorno, interessante i due emisferi ma, assai probabilmente, in diversa misura. Accogliendo, sia pure con le dovute cautele, le deduzioni che si possono trarre dalla fig. 3, ci sembra di poter interpretare la « normalità » del comportamento di N_{12} oltre il circolo polare artico, con massimi estivi e minimi invernali, come una conseguenza della progressiva diminuzione della componente orizzontale del campo magnetico terrestre, ormai quasi nulla a quelle latitudini; infatti appunto a tale componente è dovuta, per effetto dei movimenti orizzontali della atmosfera, l'insorgere di una forza verticale che trasporta verso l'alto o verso il basso, a seconda delle particolari condizioni, gli strati ionosferici determinando così addensamenti o rarefazioni della densità elettronica che possono arrivare a mascherare il « normale » andamento stagionale. Questo punto di vista sembra confermato dal fatto che alle alte latitudini Nord appare più conveniente ordinare gli Osservatori secondo la latitudine geografica che quella geomagnetica: si può per es. osservare che la latitudine geografica di Reykjavik è di parecchi gradi inferiore a quella di Point Barrow, laddove invece quella geomagnetica è superiore. È interessante notare che anche Sato (¹²) ha messo in evidenza che a dette latitudini la f_oF_2 è soggetta a un rimarcabile controllo geo-

grafico. Quanto alle più alte latitudini Sud, non è possibile svolgere considerazioni analoghe, poichè alle latitudini geomagnetiche di Deception e Port Lockroy la componente orizzontale del campo magnetico è ancora abbastanza grande, cosicchè occorrerà ancora attendere ulteriori dati sperimentali per trarre qualche ulteriore conclusione; per il momento il fatto più significativo è la constatazione che le densità elettroniche nell'estate locale sono maggiori alle 00 che alle 12.

Convieni da ultimo notare che anche in favore di un diverso comportamento dei due emisferi vanno interpretati altri risultati sperimentali: ci riferiamo alla maggiore « sensibilità » dell'emisfero Nord alla attività solare, di cui daremo notizia in una successiva nota e alla netta asimmetria tra i due emisferi nella ampiezza della oscillazione semi-annuale (cioè di periodo 6 mesi) della pressione al suolo segnalata da Schwerdtfeger e Prohaska (¹³); e così pure Sato (¹²) ha riscontrato che il rapporto tra densità elettronica a mezzogiorno al solstizio invernale e al solstizio estivo è nettamente maggiore nell'emisfero Nord che nell'emisfero Sud, specialmente a medie latitudini.

In definitiva ci sembra di poter dire che per la corretta interpretazione della variazione non stagionale di N_{12} nello strato F_2 si debba considerare la distorsione provocata, per es. secondo un meccanismo del tipo di quello di Martyn, dal campo magnetico della Terra sulla circolazione nell'alta atmosfera, circolazione che, probabilmente, ha caratteristiche sensibilmente asimmetriche nei due emisferi; e anzi, se si accettano tali vedute, lo studio degli scostamenti delle densità elettroniche dai loro valori « normali » può gettare qualche luce sui fenomeni di circolazione generale dell'atmosfera a quote superiori ai 200 km.

Roma, 10 settembre 1956

RIASSUNTO

Dall'esame comparato degli andamenti della componente N_{12} di periodo 12 mesi presente nella successione dei valori mediani mensili della densità elettronica massima nello strato

to F_2 , in circa 20 Osservatori situati tra le latitudini geografiche 52° N e 43° S, estesa agli anni 1949-1954 si deduce che la N_{12} stessa presenta a mezzogiorno un andamento press'a poco in accordo di fase tra le latitudini magnetiche di 53° N e 35° S mentre a mezzanotte la fase cambia nettamente di 180° al passaggio dell'equatore. Tale comportamento anomalo della N_{12} può interpretarsi, almeno a prima vista e grossolanamente, pensando alla presenza, accanto alla « normale » componente di ionizzazione a carattere stagionale, di una componente non stagionale, a quella sovrapposta, avente pure periodo un anno ma in identica fase dei due emisferi.

Quanto agli strati F_1 ed E si constata che essi hanno caratteristiche sostanzialmente stagionali.

Una dettagliata discussione degli andamenti di N_{12} nello strato F_2 mostra come improbabile l'ipotesi che la eventuale componente non stagionale vada attribuita a qualche agente ionizzante proveniente da fuori del sistema solare ovvero alla variazione annuale della distanza Terra-Sole, maggiore d'estate che d'inverno; non senza fondamento appare invece l'ipotesi che le rilevate differenze di comportamento di N_{12} di giorno e di notte possano essere connesse con i fenomeni di circolazione generale dell'alta atmosfera.

ABSTRACT

A comparative study of the component N_{12} of twelve months period, present in the series of the median monthly values of the maximum electron densities in the F_2 -layer, for about 20 Observatories located between the geographical latitudes 52° N and 43° S, during the years 1949-1954, shows that its behaviour at noon exhibits a substantial phase-agreement between the geomagnetic latitudes 53° N and 35° S; at midnight, instead, the component N_{12} exhibits a phase-shift of 180° at the two sides of the equator.

With regard to the F_1 and E layers one

sees that they exhibit only seasonal characteristics.

At first sight, the behaviour of N_{12} in the F_2 layer could be attributed to a non-seasonal component having a twelve months period but the same phase in the two hemispheres superposed to the normal seasonal component: however the detailed analysis of the noon and midnight behaviours of N_{12} in the F_2 -layer leads to the conclusion that the eventual non-seasonal component cannot be attributed neither to a radiation source external to the solar system nor to the annual variations of the Sun-Earth distance, greater during summer and smaller during winter.

At this stage of our knowledges, one could accept the view of a connection of the features of N_{12} in the two hemispheres with the phenomena of general circulation in the high atmosphere.

BIBLIOGRAFIA

- (1) BERKNER, L. V. - WELLS, H. W., *Terr. Magn.* **43**, 15 (1938).
- (2) ECKERSLEY, T. L., *Terr. Magn.* **45**, 25 (1940).
- (3) VERCELLI, F., *Ric. Scient.* **5**, I-364 (1934).
— Memoria CCLXXXV del R. Comitato Talassografico 1940.
- (4) DOMINICI, P. - MARIANI, F., *Ann. Geofis.* **8**, 103 (1955).
— Suppl. N. Cim. **4**, 1589 (1956).
- (5) RAWER, K., *C. R. Acad. Sci. (Paris)* **240**, 331 (1955).
- (6) MARIANI, F., *Ann. Geofis.* **8**, 59 (1955).
- (7) — *Ann. Geofis.* in corso di stampa.
- (8) JANSKY, K. G., *P. I. R. E.* **21**, 1387 (1933) e **23**, 1158 (1935).
- (9) MARTYN, D. F., *Proc. Roy. Soc.* **189**, 241 (1947).
- (10) SCHUSTER, A., *Phyl. Trans. A* **208**, 163 (1908).
- (11) CHAPMAN, S., *Phyl. Trans. A* **218**, 1 (1919).
- (12) SATO, T., *J. Geomagn. Geoelect.* **6**, 99 (1954).
- (13) SCHWERDTFEGER, W. - PROHASKA, F., *J. Met.* **13**, 217 (1956).