

# Sull'anomalia di Appleton della regione ionosferica E (\*)

(About the Appleton anomaly of the ionospheric E region)

P. DOMINICI (\*\*)

Ricevuto il 26 Settembre 1972

SUMMARY. --- The Appleton seasonal anomaly of the ionospheric E region, deduced both with a constant- $\chi$ , constant- $L$  method and a ( $\chi$ ,  $R$ ) correlation method from the normalized foE data at Rome, is briefly discussed; in particular, the facts that the amplitude of the anomaly increases with solar activity and that any explication based upon a "single parameter theory" is unsatisfactory, are emphasized.

RIASSUNTO. --- È brevemente illustrata l'anomalia stagionale di Appleton della regione E, dedotta dai dati foE dell'andamento normale ionosferico a Roma sia con un metodo a  $\chi$  ed  $R$  costanti, sia con un metodo a correlazione ( $\chi$ ,  $R$ ); sono messi in evidenza l'aumento dell'ampiezza dell'anomalia all'aumentare dell'attività solare e l'inefficacia di spiegazioni, quali quelle correnti, basate sulla variazione di un solo parametro fra i molti in gioco.

## 1. - INTRODUZIONE

Qualche anno fa E. V. Appleton (1) scoprì un'interessante anomalia, che poi da lui ha preso nome, nell'andamento annuo della frequenza critica ordinaria della regione E della ionosfera, foE. Precisamente, è usuale affermare che per questa regione è ben verificata la teoria di Chapman sulla fotoionizzazione atmosferica ad opera di radiazioni solari; a norma di tale teoria, per i dati di un determinato Osservatorio ionosferico può scriversi, in condizioni quasi stazionarie:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{foE}^2 = \frac{q_0}{a^2 \alpha} \cos \chi = C \cos \chi, \\ a = 1,24 \cdot 10^{10} \text{ MHz}^{-2} \text{m}^{-3}, \end{array} \right. \quad [1]$$

(\*) Comunicazione presentata al Convegno annuale dell'Associazione Geofisica Italiana, Roma 26-28 Aprile 1973.

(\*\*) Istituto Nazionale di Geofisica, Roma.

dove  $\chi$  è la distanza zenitale del Sole,  $q_0$  è il tasso di produzione di fotoelettroni per  $\chi = 0$ ,  $\alpha$  è il coefficiente effettivo di ricombinazione. Orbene, se si considerano valori di  $\text{foE}^4$  riferentisi a un valore costante della brillantezza del Sole ionizzante, essi dovrebbero dipendere soltanto da  $\chi$  e quindi per un assegnato valore di  $\chi$  dovrebbero essere costanti durante l'anno: si trova invece un massimo invernale.

## 2. - ANALISI STATISTICA DEI DATI

A partire dall'andamento normale dei valori mediani mensili di  $\text{foE}$  ricavati nell'Osservatorio ionosferico di Roma dell'Istituto Nazionale di Geofisica nel periodo 1948-70 e assumendo come indice della brillantezza del Sole ionizzante il numero delle macchie solari  $R$ , abbiamo estratto i valori mediani mensili di  $\text{foE}^4$  per  $R = 100$ ,  $\cos \chi = 0,4$  e per  $R = 100$ ,  $\cos \chi = 0,2$ , riportati nelle curve  $a$ ,  $c$  di fig.: il massimo invernale è ben evidente. Per confronto, sono riportati anche i valori di  $\text{foE}^4$  per  $R = 0$ ,  $\cos \chi = 0,4$ , nella curva  $b$ : l'andamento è assai meno pronunciato. Questo modo di rappresentare l'anomalia, che chiameremo « metodo a  $\chi$  costante », è sostanzialmente quello seguito da Appleton (<sup>1</sup>), salvo il fatto che qui la normalizzazione verso assegnati valori di  $R$  è stata fatta mediante rette di regressione, mentre là manca una vera e propria normalizzazione, Appleton avendo considerato medie di valori mediani mensili in un periodo, undecennale, di variazione di  $R$ .

Il procedimento seguito può esser criticato perchè mette a confronto dati non omogenei, riferentisi a condizioni variamente diverse dalla stazionarietà (a Roma,  $\cos \chi = 0,4$  corrisponde circa alle ore 12 a Dicembre, circa alle ore 7 e alle ore 17 a Giugno), cioè a condizioni rappresentate generalmente, più che dalla [1], da un'equazione di equilibrio del tipo:

$$2 a \text{foE} \frac{d(\text{foE})}{dt} = q_0 \cos \chi - a^2 \alpha \text{foE}^4. \quad [2]$$

Allo scopo di avere una rappresentazione esente da tale difetto abbiamo ricercato, mese per mese, il legame fra  $\text{foE}^4$  e  $\cos \chi$  per  $R = 0$ , mediante rette di regressione in un riferimento logaritmico; come già altri, abbiamo trovato che il legame anzidetto può essere espresso dalla relazione:

$$\text{foE}^4 = C_0 (\cos \chi)^2. \quad [3]$$

Come risulta dalla curva  $e$  in figura, l'esponente  $p$  non presenta una significativa variazione stagionale, e ad esso è attribuibile il valor medio  $\bar{p} = 1,27$  (secondo la teoria di Chapman, e dunque in accordo con la [1], si sarebbe dovuto avere  $\bar{p} = 1,00$ ); invece, l'andamento della quantità  $C_0$  (curva  $d$ ), che è il valore di  $foE^4$  per  $\chi = 0$ ,  $R = 0$ , rappresenta l'anomalia di Appleton a Roma, con un regolare, netto massimo invernale.

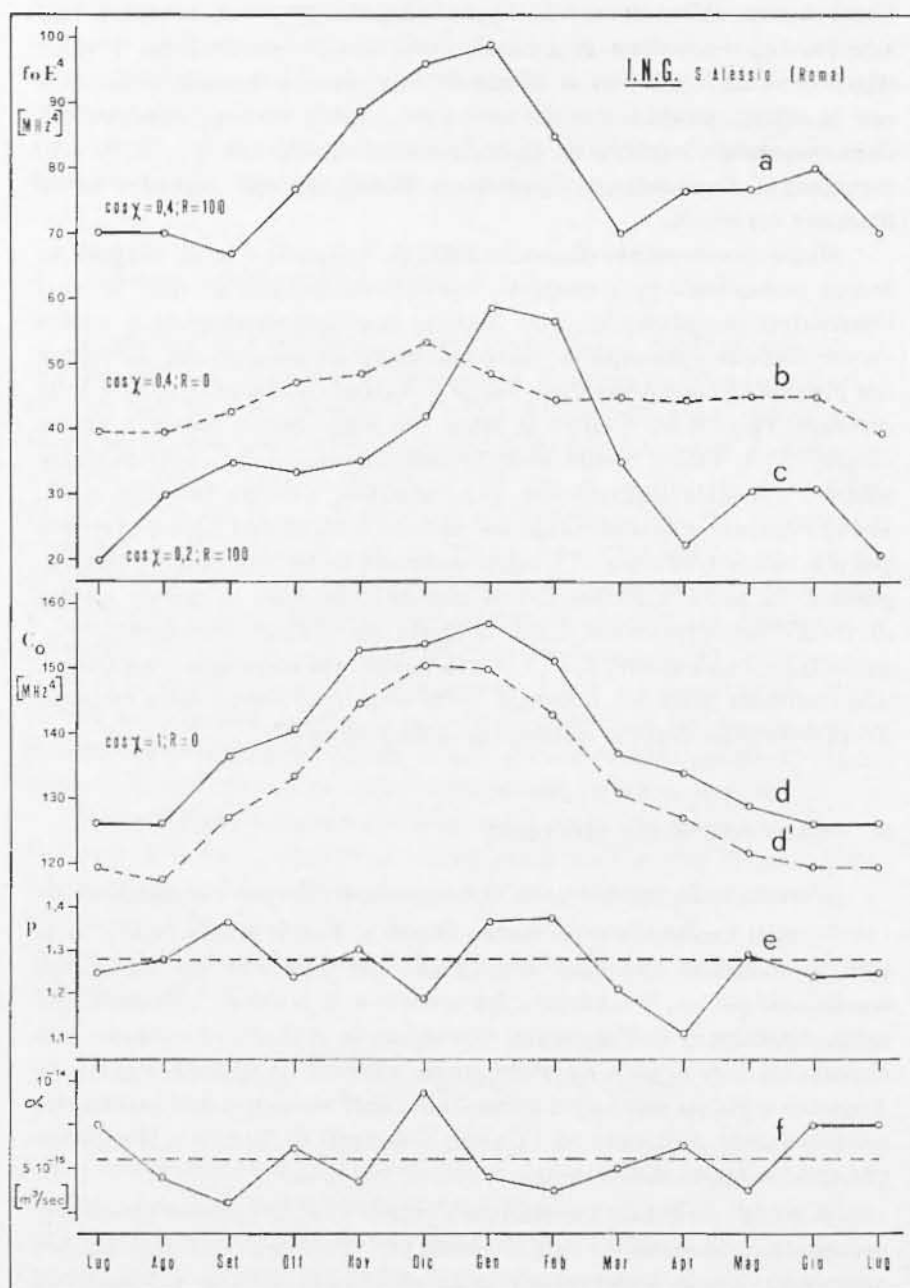
Molto recentemente (Gennaio 1973) S. S. Kouris e L. M. Muggleton hanno comunicato (<sup>2</sup>) i risultati ottenuti applicando ai dati di vari Osservatori ionosferici un loro metodo che sostanzialmente è quello « a correlazione » ora esposto, salvo una maggiore accuratezza, derivante dal prendere in considerazione anche la variazione durante l'anno della distanza Terra-Sole, e salvo il fatto che come indice solare è preso, anziché  $R$ , il valore medio mensile dell'intensità della radioemissione solare a 2,8 GHz (equivalente, per statistiche a lungo termine, a  $R$ ). Relativamente ai dati di Roma nel periodo 1957-67 essi hanno ottenuto per  $\bar{p}$  il valore 1,22 e per  $C_0$  i valori congiunti in fig. con la linea tratteggiata  $d'$ ; a parte una sistematica piccola differenza, a nostro avviso derivante principalmente dalla diversità dei periodi considerati, l'accordo fra gli andamenti  $d$ ,  $d'$ , è molto buono: ciò costituisce, fra l'altro, una conferma della non influenza della variazione annua della distanza Terra-Sole sulla densità elettronica della regione E.

### 3. - DISCUSSIONE DEI RISULTATI

L'esame delle curve  $a \div e$  in figura porta a rilevare i seguenti fatti:

(a) il « metodo a  $\chi$  costante » (curve  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) si presta bene a mettere in evidenza eventuali dipendenze dell'anomalia da particolari condizioni: per es., il confronto fra le curve  $a$ ,  $b$ , porta a riconoscere una netta dipendenza dell'ampiezza dell'anomalia dall'attività solare: tale circostanza non ci pare sia stata sinora rilevata (il metodo seguito da Appleton e poi da molti altri normalizza i dati verso  $R$ , come accennato, semplicemente mediando su 11 anni; il metodo di Kouris e Muggleton presenta la stessa limitazione).

(b) Il « metodo a correlazione » (curve  $d$ ,  $d'$ ,  $e$ ) realizza un'efficace perequazione statistica e ben si presta per studi con dati, non sempre omogenei, di vari Osservatori; come accennato, Kouris e Muggleton lo hanno applicato ai dati di una quarantina di Osservatori ionosferici distribuiti in latitudine intorno ai meridiani  $5^\circ\text{E}$ ,  $150^\circ\text{E}$ ,  $75^\circ\text{W}$ , otte-



nendo (2) una conferma su scala planetaria delle già note caratteristiche dell'anomalia, principale fra tutte il massimo nell'inverno locale, con forte effetto di latitudine (ampiezza piccola nella fascia equatoriale, massima a media latitudine, con asimmetrie fra i due emisferi) e apprezzabile effetto di longitudine. Dalla figura scaturisce una circostanza abbastanza interessante, e cioè che, come ben risulta dal confronto fra le curve  $c$  ( $\chi \simeq 78^\circ$ ) ed  $e$ , l'andamento dell'esponente  $p$  nella [3], al quale si sarebbe portati a non dare importanza, è correlato con le variazioni dell'anomalia a grandi distanze zenitali; a posteriori, la cosa non sorprende ove si ponga attenzione al fatto che la pendenza delle rette di regressione  $\log(\text{foE}^4 \cos \chi)$ , da cui  $p$  è ricavato, dipende fortemente dai valori di  $\text{foE}^4$  relativi a grandi valori di  $\chi$ .

Al fine di verificare la significatività delle rappresentazioni proposte, abbiamo considerato per ogni mese, e quindi per un determinato valore di  $q_0$ , coppie di ore simmetriche rispetto al mezzogiorno locale, e quindi per un determinato valore di  $\cos \chi$ ; ricavando dai dati normalizzati per  $R = 0$  le quantità  $\text{foE}$ ,  $d(\text{foE})/dt$ ,  $\text{foE}^4$ , abbiamo calcolato il coefficiente effettivo di ricombinazione  $\alpha$  eliminando  $q_0 \cos \chi$  fra le coppie di equazioni [2] corrispondenti alle ore scelte; s'è ottenuta la curva  $f$  in figura, che riproduce, controfase come dev'essere, l'andamento dell'esponente  $p$ .

È interessante osservare che se si torna a condizioni rigorosamente stazionarie, considerando valori di  $\text{foE}^4$  al mezzogiorno locale, e si ricava  $q_0$  dalla [1] utilizzando i predetti valori di  $\alpha$ , si ottiene per  $q_0$  un andamento identico a quello della curva  $f$ , con valori intorno a  $10^6 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ . Tali valori numerici di  $q_0$  sono accettabili, mentre l'andamento è incompatibile con gli altri risultati. Va tenuto presente che dei tre parametri in gioco, e cioè  $\text{foE}$ ,  $\alpha$ ,  $q_0$ , quello che certamente contiene l'anomalia in termini di quantità osservabili è  $\text{foE}$ ; per  $\alpha$  è possibile, come indicato, una valutazione parzialmente indipendente; per  $q_0$  ciò che si ottiene è soltanto di riversare su esso il carattere di  $\alpha$ , senza alcun significato fisico. Ciò spiega l'infinità delle proposte di spiegare l'anomalia di Appleton con teorie «a parametro unico», basate sulla costanza di  $q_0$  e sull'assunzione che l'apparente variazione di  $\alpha$  sia dovuta a corrispondenti variazioni di temperatura e di composizione dei gas atmosferici.

Lo stesso si può dire a proposito della spiegazione, cui inclina attualmente la maggior parte degli studiosi, basata su variazioni di un termine di trasporto verticale collegato al sistema delle correnti  $Sq$ . In tale teoria, esprimendo, come fatto sinora, la densità elettronica mas-

sima  $N_M$  in termini di frequenza critica ordinaria e dando al termine di trasporto la forma  $\text{div}(N_M v)$ , con  $v$  velocità verticale di scorrimento, l'equazione di equilibrio può essere assunta nella forma:

$$\frac{d(\text{foE})}{dt} = \frac{q_0 \cos \chi - a^2 \alpha \text{foE}^4}{2a \text{foE}} - \left[ \frac{\text{foE}}{2} \frac{\partial v}{\partial h} + v \frac{\partial(\text{foE})}{\partial h} \right]. \quad [4]$$

Come si vede, il termine di trasporto viene a dipendere anche da  $\text{foE}$  e dal gradiente verticale  $\partial(\text{foE})/\partial h$ , cioè ad esso viene impressa anche una variazione annua che in realtà, anziché derivare dalla velocità di scorrimento, è propria di  $\text{foE}$  perché, per es., deriva da  $a$  (che invece, al pari di  $q_0$ , è assunto costante). Nel citato articolo di Kouris e Muggleton (2) è fatta un'eccellente rassegna dei lavori basati sulla spiegazione in discussione, e la conclusione, come era da aspettarsi, è che gli argomenti a favore sono soltanto qualitativi.

#### 4. - CONCLUSIONI

A questo punto, quel che si può dire è che l'anomalia di Appleton rivela una sino a qualche tempo fa insospettata natura complessa della regione E, contribuendo, con altri fatti quali la riconosciuta non linearità di responso all'attività solare e l'esistenza di una consistente E notturna, ad apparentare questa regione alla sovrastante regione F: si viene così a costituire un'identità morfologica fra le due regioni (cui probabilmente partecipa anche la regione D in virtù della sua ben nota « anomalia invernale »), la differenza fra esse consistendo nella diversa evidenza del comportamento « non alla Chapman ». E dunque, per dar conto dell'anomalia della regione E, posto che spiegazioni semplici riescono non plausibili, occorrerà trasferire alla regione E i meccanismi, di trasporto e no, proposti e in via di studio per dar conto delle assai più vistose anomalie della regione F.

#### BIBLIOGRAFIA

(1) APPLETON E. V., 1963. - *Jour. Atm. Terr. Phys.*, **25**, 577.

(2) KOURIS S. S., MUGGLETON L. M., 1973. - *Jour. Atm. Terr. Phys.*, **35**, 141.