

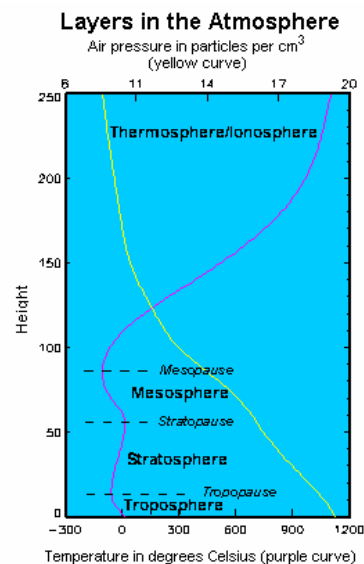
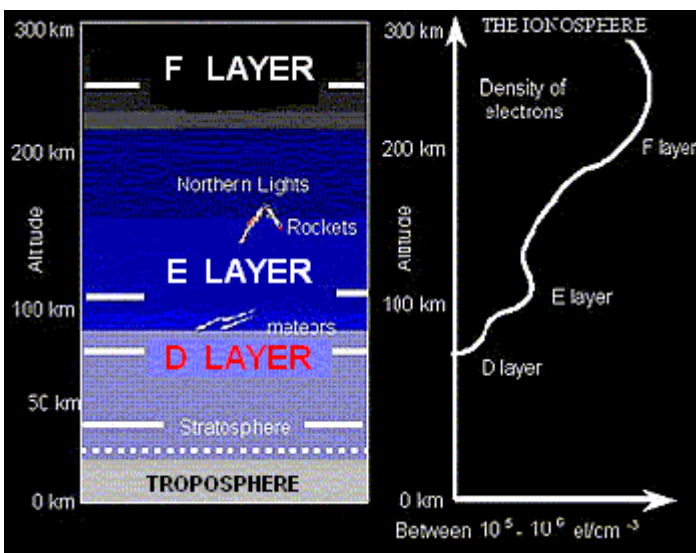
STRUTTURA MOLECOLARE DEGLI STRATI IONOSFERICI

IONOSFERA

La ionosfera è quella parte dell'alta atmosfera dove ioni ed elettroni sono presenti in quantità sufficiente da modificare la propagazione delle onde radio ad alta frequenza che la attraversano. In questa zona la conducibilità elettrica è talmente elevata da permettere la formazione di un sistema di correnti. Essa è parte integrante dell'atmosfera neutra, la quale circonda il nostro pianeta sino a quote alle quali sono ancora sensibili, sulle particelle dei gas, azioni gravitazionali ed elettromagnetiche dovute alla Terra stessa. Il comportamento dell'atmosfera viene soprattutto influenzato dalla radiazione solare ultravioletta che viene assorbita dalle varie specie chimiche presenti e conseguentemente diffusa o riemessa sotto forma di radiazione infrarossa. Lo scambio continuo di energia, oltre che di materia, con lo spazio circostante dà subito modo di definire l'atmosfera come un sistema aperto. La ionosfera viene prodotta da un ampio spettro di radiazione solare, nel visibile e nel non visibile, che dissocia e ionizza la miscela di gas presente nell'alta atmosfera. A causa della stretta dipendenza tra l'intensità di radiazione solare e l'angolo di elevazione del Sole, le proprietà della ionosfera, specialmente per ciò che riguarda la densità degli elettroni liberi, mostrano sia variazioni temporali, che locali. La ionosfera, infatti, evidenzia variazioni giornaliere e stagionali ed è dominata dall'influenza dell'attività solare. Essa dipende, inoltre, dalla latitudine geografica, ed, infine, dal campo geomagnetico.

Accanto alle variazioni suddette, meglio conosciute come variazioni regolari, vi sono le cosiddette variazioni irregolari, o disturbi ionosferici. Le cause a monte di questi disturbi sono molteplici, senza dubbio però tutte fanno capo all'interazione tra la ionosfera e le particelle di origine extraterrestre, prevalentemente solare, che penetrano nell'atmosfera. L'indagine e lo studio della ionosfera è nato dal grande interesse suscitato dalle applicazioni scientifiche e tecnologiche basate sulla riflessione delle onde radio. Il progresso scientifico ha, poi, permesso che tale studio potesse essere approfondito tramite misure effettuate da satelliti e da missili, oltre che mediante le misure già disponibili da stazioni poste a terra.

I massimi di densità elettronica costituiscono il criterio di separazione tra le diverse zone in cui viene convenzionalmente suddivisa la ionosfera. Tali zone individuano le regioni D, E, F. La ionosfera si estende, approssimativamente, tra i 50 ed i 6370 km (pari ad una distanza circa uguale a quella di un raggio terrestre) dalla superficie della Terra. A quote immediatamente superiori si trova la zona conosciuta come protonosfera o plasmasfera.



Regione D

si estende dai 50 ai 90 Km circa. In essa la densità elettronica è molto più bassa di quella molecolare, e la frequenza di collisione tra gli elettroni liberi e le molecole è relativamente alta ed è, in funzione della pressione atmosferica, pari a: $n_m = 8 \cdot 10^5 p s^{-1}$, dove n_m è la frequenza di collisione di elettroni dotati di energia termica pari a KT , in cui $K = 1.38 \cdot 10^{-23} J K^{-1}$ è la costante di Boltzmann, T è la temperatura e p è la pressione atmosferica. La composizione dell'atmosfera nella regione D è, grosso modo, la stessa di quella che si ha sulla superficie terrestre, anche se, alcuni costituenti minori, quali NO , O_3 , O_2 giocano un ruolo importante.

All'interno della regione D vi sono due strati, lo strato D e lo strato C. Il primo viene prodotto dai raggi solari ultravioletti e dei raggi X, il secondo da raggi di origine galattica. Nella regione D tra i 50 e gli 85 km la temperatura della miscela neutra decresce da 260 K a 180 K. Nella termosfera, sopra gli 85 Km, la temperatura comincia lentamente a risalire. I profili di densità elettronica sono fortemente variabili da un giorno all'altro. Durante un giorno qualsiasi la concentrazione elettronica segue, con buona approssimazione, un andamento che va come \cos^n , dove n è 8 e a $10^9 m^{-3}$. Ad alte latitudini, invece, durante le ore centrali dei giorni invernali, la densità elettronica sotto i 75 km è talmente bassa da non poter essere misurata.

La composizione ionica della regione D è piuttosto complicata. Sono, infatti, presenti sia ioni positivi, che ioni negativi. Questi ultimi, in particolar modo, assumono un'importanza particolare durante le ore notturne. Tra gli ioni positivi, si vogliono citare O_2^+ e NO^+ , che attraverso una serie di reazioni a catena danno luogo ad ulteriori ioni positivi. Gli ioni negativi sono dominati dalla presenza di O_2^- e di NO_3^- .

Uno dei metodi di indagine della regione D si basa sull'analisi dell'assorbimento delle radioonde che la attraversano.

Regione E

viene definita come quella parte dell'atmosfera tra i 90 ed i 140 km di altezza, anche se questi confini sono piuttosto arbitrari. Nella regione E la temperatura cresce rapidamente con la quota, e si passa dall'atmosfera, in cui i gas atmosferici sono essenzialmente mescolati tra loro, all'eterosfera, in cui i vari costituenti si separano per diffusione. Sopra gli 80 km vi è un' apprezzabile dissociazione di ossigeno molecolare O_2 in ossigeno atomico O. Il livello in cui vi è un massimo di concentrazione di O si trova tra gli 85 ed i 100 km. La regione E ha una grande importanza dal punto di vista geomagnetico, poiché, a queste quote, sono presenti sistemi di correnti, quali l'elettrogetto equatoriale e l'elettrogetto aurorale, responsabili di alcune importanti variazioni geomagnetiche. La regione E può essere suddivisa in due parti: lo strato E regolare e l'E sporadico. A sua volta lo strato E regolare può essere diviso nelle zone E_1 ed E_2 . Lo strato E regolare segue l'andamento della ionizzazione per fotoionizzazione solare e, quindi, mostra il suo massimo di frequenza critica f_0E intorno al mezzogiorno locale, mentre l'E sporadico si manifesta sia di giorno che di notte. In questa regione la variazione stagionale della frequenza critica evidenzia valori maggiori durante i mesi estivi rispetto a quelli che si riscontrano durante i mesi invernali.

Gli ioni positivi che dominano la regione E sono O_2^+ e NO^+ . La produzione dello ione dell'ossigeno molecolare è dovuta all'assorbimento della radiazione C(III) e della radiazione Lyman b. Ulteriori ioni vengono prodotti da radiazioni su lunghezze d'onda tipiche dei raggi X. Nella regione E la variazione di densità elettronica è grossomodo in equilibrio con la quantità media degli ioni prodotti tramite processi di ricombinazione. Proprio a causa di tale caratteristica, ci si aspetterebbe un andamento della densità elettronica in cui, questa, durante le ore notturne, fosse praticamente trascurabile. In realtà, di notte la presenza di ioni ed elettroni nella regione E è apprezzabile. Si suppone che questo sia dovuto, oltre che a fenomeni di trasporto degli elettroni, anche alla ionizzazione provocata dalla penetrazione nell'atmosfera delle meteore, le quali, incendiandosi, emettono energie con lunghezze d'onda tipiche delle radiazioni Lyman a, Lyman b e dell'He II (30.4 nm). Si deve necessariamente menzionare anche la presenza, a queste quote, dell'ossido nitrico NO, che, con lo ione O_2^+ dà luogo alla formazione dello ione NO^+ .

Regione F1

denota quella parte dell'atmosfera compresa tra 140 e 220 km circa. Il suo costituente più importante è l'azoto molecolare N_2 , che viene ionizzato dai raggi solari ultravioletti relativi a lunghezze d'onda che vanno dai 275 ai 796 Å. La temperatura della regione F_1 aumenta rapidamente con la quota, e va da circa 500 K a 140 km ad oltre i 1000 K a 220 km. Il massimo di produzione elettronica cade proprio in questa zona, intorno ai 180 km.

In questa regione gli ioni più importanti sono NO^+ , sopra ai 140 km circa, e O^+ , presente soprattutto a quote maggiori a 170 km. Da ciò si deduce che, la presenza di ioni molecolari sotto i 170 km assicura un andamento della densità elettronica in accordo con la produzione relativa degli elettroni. Il processo a due stadi, di cui si è parlato precedentemente, invece, non garantisce più tale comportamento nelle zone più alte della regione F_1 . Il massimo di produzione ionica si trova intorno ai 180 km, che coincide con la quota del massimo di densità elettronica dello strato F_1 . L'andamento diurno della frequenza critica f_0F_1 è, qualitativamente, lo stesso di quello osservato nella regione E, cioè esso presenta un massimo nelle ore intorno al mezzogiorno locale. Anche le variazioni stagionali risultano essere in accordo con quelle dello strato E, quindi si avranno valori della frequenza critica più alti in estate che in inverno.

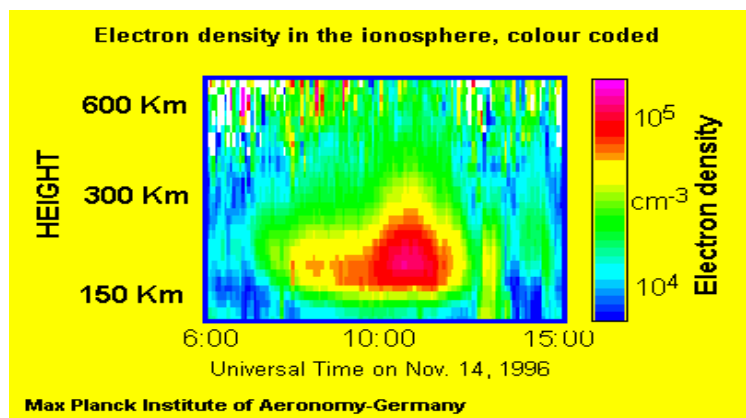


Fig.1 Diagramma che raffigura la densità elettronica per centimetro cubo, in relazione all'altezza e all'ora locale. Misurazione effettuata con Ionosonde a cura del Max Planck Institute of Aeronomy.

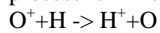
Regione F2

si estende approssimativamente dai 220 ai 2000 km. Sebbene il picco di produzione elettronica si trovi nella regione F_1 , il massimo di densità elettronica cade nella regione F_2 , tra 220 e 500 km circa. Le ragioni di questo fenomeno sono imputabili, da un lato al fatto che il fattore di perdita elettronica decresce con l'altezza, conseguentemente alla diminuzione della densità molecolare in funzione della quota, e, dall'altro al fatto che tra la protonosfera e la ionosfera esiste un flusso di plasma. La specie gassosa dominante, a queste quote, è l'ossigeno atomico O, sebbene anche N_2 e O_2 abbiano ruoli piuttosto importanti nel processo d'interscambio tra ione ed atomo, che è alla base della perdita elettronica dovuta al fenomeno della ricombinazione dissociativa. A causa della dissociazione di O_2 ed alla conseguente formazione di O, il quale possiede una massa molecolare più bassa, l'altezza di scala, nella regione F_2 , aumenta. Lo ione dominante della regione F_2 è O^+ . Il gas neutro maggiormente presente è l'ossigeno atomico O, ma N_2 e O_2 sono ugualmente importanti per il ruolo che giocano nei fenomeni di perdita del plasma. La quota del massimo di densità elettronica è altamente variabile poiché dipende dal vento neutro e dalla deriva elettromagnetica. In assenza di diffusione, la densità ionica

aumenterebbe, conseguentemente alla grande diminuzione del fattore di perdita elettronica, fino a quote alle quali i componenti neutri in grado di essere ionizzati divenissero insufficienti. Comunque, gli ioni O^+ , prodotti nella zona sovrastante la regione F_2 , diffondono verso gli strati sottostanti attraverso il massimo della regione, con velocità tipicamente dell'ordine di $10/20 \text{ m s}^{-1}$. A differenza delle regioni D, E ed F_1 , lo strato F_2 è fortemente presente anche durante le ore notturne. Da ciò si può ben comprendere la sua primaria importanza nelle radiocomunicazioni. Durante l'arco delle 24 ore la frequenza critica raggiunge il suo valore minimo immediatamente prima dell'alba per poi crescere rapidamente, a causa del fenomeno della ricombinazione, nelle ore successive. La regione F_2 si differenzia anche nell'andamento stagionale della f_oF_2 , infatti nelle zone a medie latitudini essa assume valori maggiori nei mesi invernali e minori in quelli estivi.

Al di sopra della regione F_2 si trova una zona, che si estende dai 300 ai 1000 km circa, in cui l'accesso alle onde radio ad alta frequenza è impossibile. A queste quote domina la presenza dello ione O^+ , e la densità elettronica decresce rapidamente con l'altezza. Al di sopra di una certa quota, H^+ diventa lo ione dominante e l'altezza di scala torna ad aumentare sensibilmente. A 1000 km la densità elettronica è dell'ordine di 10^{10} - 10^{11} elettroni/ m^3 .

Infine, dalla quota in cui si ha l'uguaglianza tra la concentrazione di O^+ e quella di H^+ , fino alla zona in cui la densità di plasma varia di uno o due ordini di grandezza, si estende la "protonosfera" o "plasmafera". Questa può essere pensata come quella parte della magnetosfera che co-ruota con la Terra. All'interno della protonosfera la densità dei componenti neutri è piuttosto piccola, e il profilo del plasma viene determinato da fenomeni di trasporto. I protoni vengono prodotti nella parte più bassa di questa regione a causa di processi chimici del tipo, ad esempio, di:



I confini della protonosfera variano sensibilmente, a seconda della stagione dell'anno e dell'attività solare. È importante notare che, nella protonosfera, non vi è produzione di plasma, quindi essa si comporta come un grande serbatoio: prende il plasma dalla ionosfera durante il giorno, lo "immagazzina" in un ambiente privo di fattori di perdita e lo restituisce alla ionosfera durante la notte, contribuendo, così, a mantenere lo strato F nelle ore notturne.

REGIONI IONOSFERICHE (GIORNO E NOTTE)

