

### Frequenza di plasma e propagazione atmosferica

La propagazione delle onde radio nell'atmosfera è fortemente influenzata dallo stato di ionizzazione della ionosfera, la parte più alta dell'atmosfera terrestre. Il gas dell'atmosfera viene ionizzato principalmente dalla radiazione solare e si formano degli strati che sono in grado di riflettere le onde radio che hanno una frequenza inferiore a circa 30 MHz. I processi fisici che determinano il comportamento della ionosfera sono:

- il processo di ionizzazione dei singoli atomi e molecole
- la ricombinazione di ioni ed elettroni
- il passaggio delle onde elettromagnetiche nei plasmi (gas ionizzati)

Qui discutiamo brevemente solo l'ultimo punto, ed in particolare deriviamo la *frequenza di plasma*, il parametro che determina il comportamento degli strati ionizzati.

Si consideri un volume occupato da gas neutro e da gas parzialmente ionizzato, e sia  $n_0$  la densità numerica delle cariche (sia positive che negative, il gas è globalmente neutro). Quando un'onda elettromagnetica piana incide su questo volume, il campo elettrico dell'onda produce uno spostamento degli elettroni e degli ioni; lo spostamento degli ioni è assai più ridotto di quello degli elettroni, perché uno ione pesa assai più degli elettroni (circa 2000 volte di più nel caso dell'idrogeno atomico, il gas più leggero), quindi consideriamo solo lo spostamento degli elettroni. A causa dello spostamento, gli elettroni che prima occupavano uno spessore  $\Delta x$ , occupano uno spessore  $\Delta x + \Delta s$ , e quindi la densità degli elettroni scala del fattore  $\Delta x / (\Delta x + \Delta s)$  (l'onda elettromagnetica ha prodotto una perturbazione dell'equilibrio del gas ionizzato). Questo significa che la densità di carica totale è

$$\rho = qn_0 - qn_0 \left( \frac{\Delta x}{\Delta x + \Delta s} \right) = qn_0 \frac{\Delta s}{\Delta x + \Delta s} \approx qn_0 \frac{\Delta s}{\Delta x} \approx qn_0 \frac{ds}{dx}$$

( $q$  è la carica elementare) e questa densità di carica è legata al campo elettrico dalla legge di Gauss (stiamo considerando un'onda piana polarizzata linearmente e sopravvive solo la componente del campo elettrico parallela alla direzione di polarizzazione che è proprio la direzione dell'asse  $x$ ):

$$\frac{dE_x}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

e questo mostra che la forza su ciascun elettrone si ricava dall'equazione

$$\frac{dF}{dx} = -\frac{q\rho}{\epsilon_0}$$

Quindi troviamo che

$$\frac{dF}{dx} \approx -\frac{q^2 n_0}{\epsilon_0} \frac{ds}{dx}$$

da cui

$$F \approx -\frac{q^2 n_0}{\epsilon_0} s + \text{cost}$$

Poichè la forza è nulla quando lo spostamento è nullo, troviamo infine l'equazione del moto per un singolo elettrone:

$$F = m_e \frac{d^2 s}{dt^2} \approx -\frac{q^2 n_0}{\epsilon_0} s$$

dove  $m_e$  è la massa elettronica, e quindi

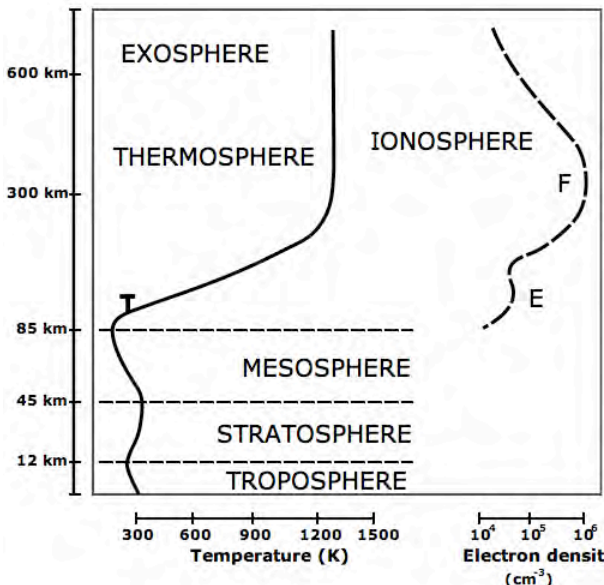
$$\frac{d^2 s}{dt^2} \approx -\frac{q^2 n_0}{m_e \epsilon_0} s$$

Quest'ultima è l'equazione di un oscillatore armonico con frequenza propria uguale a

$$\omega_p \approx \sqrt{\frac{q^2 n_0}{m_e \epsilon_0}}$$

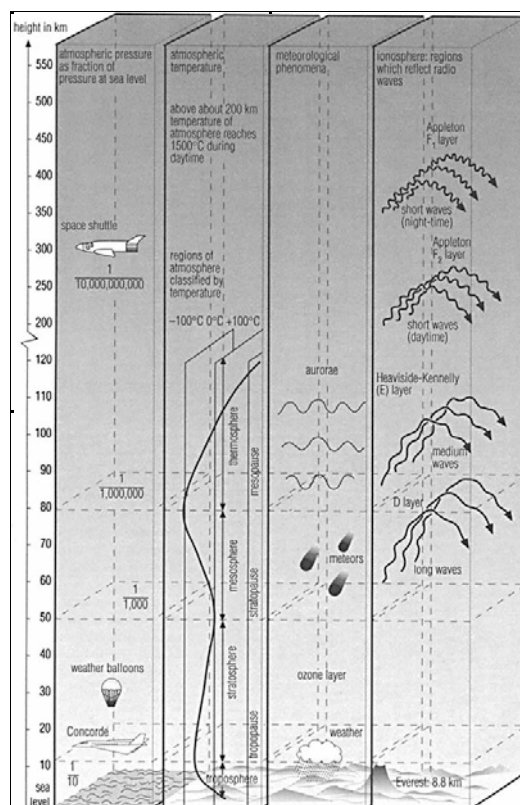
detta appunto *frequenza di plasma*. Si può dimostrare che onde elettromagnetiche con frequenza inferiore alla frequenza di plasma vengono riflesse, mentre se la frequenza è superiore alla frequenza di plasma le onde vengono trasmesse.

Si noti che il solo parametro ambientale che determina la frequenza di plasma è la densità numerica di ioni (e elettroni): tanto più alta è la densità e tanto più alta è la frequenza di plasma. La figura seguente mostra la densità elettronica nell'atmosfera in funzione dell'altezza

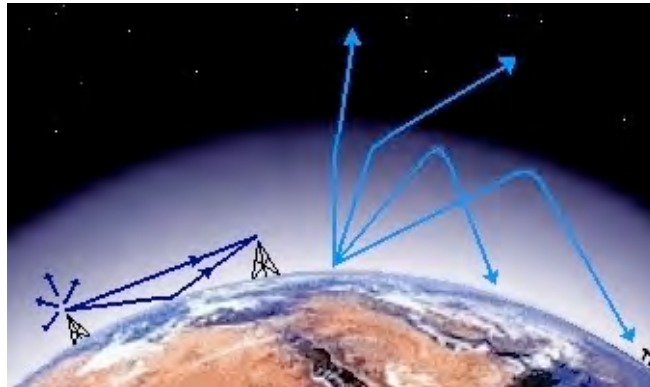


come si vede, la densità sale a partire da 80 km: la riflessione delle onde elettromagnetiche di frequenza più alta avviene quindi ad altezza maggiore. Si noti inoltre che a causa della composizione chimica variabile in funzione dell'altezza, la ionizzazione tende ad organizzarsi in zone stratificate (gli *strati* della ionosfera).

La figura seguente mostra la posizione dei principali strati ionosferici in relazione agli altri fenomeni atmosferici.



La propagazione avviene quindi o in modo diretto dall'antenna trasmittente al ricevitore (ground wave) oppure tramite una o più riflessioni (sky wave)



La tabella seguente mostra i modi di propagazione per onde radio di diverse frequenze:

banda		frequenza	lunghezza d'onda	propagazione
VLF	Very Low Frequency	3–30 kHz	100–10 km	onde guidate tra terra e ionosfera;
LF	Low Frequency	30–300 kHz	10–1 km	onde guidate tra terra e strato D della ionosfera; onde di superficie;
MF	Medium Frequency	300–3000 kHz	1000–100 m	onde di superficie; rifrazione ionosferica negli strati E ed F di notte, quando l'assorbimento dello strato D si attenua;
HF	High Frequency (Short Wave)	3–30 MHz	100–10 m	rifrazione ionosferica nello strato E e negli strati F1, F2;
VHF	Very High Frequency	30–300 MHz	10–1 m	raramente rifrazione ionosferica nello strato E, estremamente rara negli strati F1, F2 durante attività solare, fino a 80 MHz; generalmente onda diretta;
UHF	Ultra High Frequency	300–3000 MHz	1–0.1 m	onda diretta;
SHF	Super High Frequency	3–30 GHz	100–10 mm	onda diretta;
EHF	Extremely High Frequency	30–300 GHz	10–1 mm	onda diretta limitata da assorbimento atmosferico.

Si noti che la propagazione delle onde radio che sfruttano la rifrazione ionosferica dipende dall'attività solare.