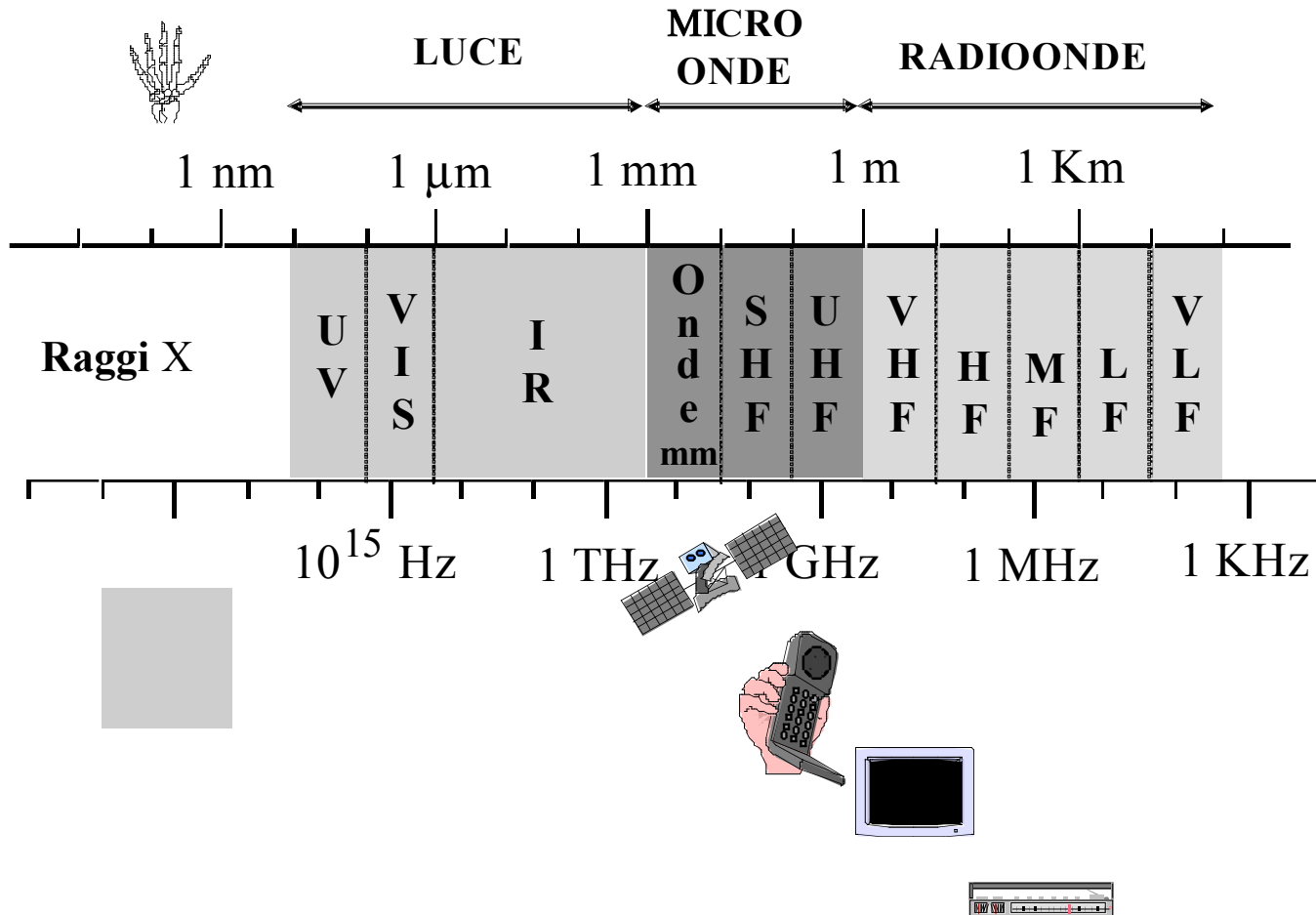


# A - TEORIA DELLA PROPAGAZIONE RADIO IN AMBIENTE REALE

- **Effetto di gas atmosferici e idrometeore**
  - Attenuazione supplementare da gas atmosferici
  - Attenuazione supplementare da pioggia
  - Propagazione ionosferica, troposcatter
- Propagazione in mezzi con disomogenità distribuita – Propagazione troposferica
  - Cenni di ottica geometrica in mezzi con  $n$  debolmente variabile.
  - Propagazione in mezzi a stratificazione piana e sferica. Propagazione troposferica, orizzonte radio e rettificazione del suolo/raggio
- Propagazione in mezzi con disomogenità concentrate – Propagazione in presenza di ostacoli
  - Riflessione del suolo, diffrazione da knife-edge, ellissoide di Fresnel
  - Metodi per il calcolo della diffrazione da ostacoli
  - Teoria geometrica della propagazione: trasmissione attraverso uno strato, diffrazione da spigolo. Propagazione multicammino.



# Lo Spettro Elettromagnetico





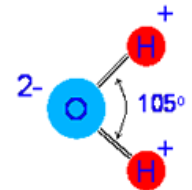
# Gas atmosferici e attenuazione (I)

Alcuni gas componenti l'atmosfera (es: O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) provocano attenuazione perché le loro molecole, non uniformi elettricamente risuonano a determinate frequenze, disperdendo energia in calore

L'attenuazione da gas atmosferici varia al variare della concentrazione dei gas. In linea di massima l'attenuazione dovuta ad un gas dipende linearmente dalla concentrazione dello stesso

Per il vapor d'acqua si ha la seguente formula empirica

$$A_{\text{water}} = \left\{ 0.050 + 0.0021 \rho + \frac{3.6}{(f - 22.2)^2 + 8.5} + \frac{10.6}{(f - 183.3)^2 + 9.0} + \frac{8.9}{(f - 325.4)^2 + 26.3} \right\} f^2 \rho 10^{-4} \quad \text{dB/km}$$



*Attenuazione specifica da H<sub>2</sub>O;  $\rho$  è la concentrazione in g/m<sup>3</sup>*

*Collegamento al livello del mare.  $f < 350$  GHz*



# Gas atmosferici e attenuazione (II)

Si può avere concentrazione in ppmv (parti per milione in volume) oppure ppmm (parti per milione in massa). Oppure in percentuale in volume, in massa o in numero di molecole, oppure in massa su volume ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

In particolare la concentrazione del vapor d'acqua ( $\text{H}_2\text{O}$  in stato gassoso) è particolarmente variabile.

La concentrazione di ossigeno varia meno. Rispetto ai valori pre-industriali è comunque leggermente calata a causa della attività umana (parallelamente la concentrazione di  $\text{CO}_2$  è cresciuta da 280 fino a 384 ppmv (0.038% in vol.), quasi 40 % in più rispetto al 1800 !!

Le concentrazioni medie dei gas dipendono anche fortemente dalla quota e dalla zona geografica. Il riferimento è L' atmosfera standard



# Composizione dell' atmosfera

*ppmv: parts per million by volume*

## Composition of dry standard atmosphere, by volume (sea level)

Gas	Volume
<u>Nitrogen</u> (N <sub>2</sub> )	780,840 ppmv (78.084%)
<u>Oxygen</u> (O <sub>2</sub> )	209,460 ppmv (20.946%)
<u>Argon</u> (Ar)	9,340 ppmv (0.9340%)
<u>Carbon dioxide</u> (CO <sub>2</sub> )	383 ppmv (0.0383%)
<u>Neon</u> (Ne)	18.18 ppmv
<u>Helium</u> (He)	5.24 ppmv
<u>Methane</u> (CH <sub>4</sub> )	1.745 ppmv
<u>Krypton</u> (Kr)	1.14 ppmv
<u>Hydrogen</u> (H <sub>2</sub> )	0.55 ppmv

**Not included in above dry atmosphere:**

Water vapor (H<sub>2</sub>O) typically 1% to 4%  
(highly variable)

**Standard atmosphere**  
**Pressure: 1013 hPa**  
**Temperature: 15 °C**  
**Humidity: 7.5 g/m<sup>3</sup> (1%)**



# Attenuazione specifica da gas atmosferici al suolo

Le molecole di  $H_2O$  e  $O_2$  risuonano a determinate frequenze:

righe di assorbimento

es: attenuaz. specifica:

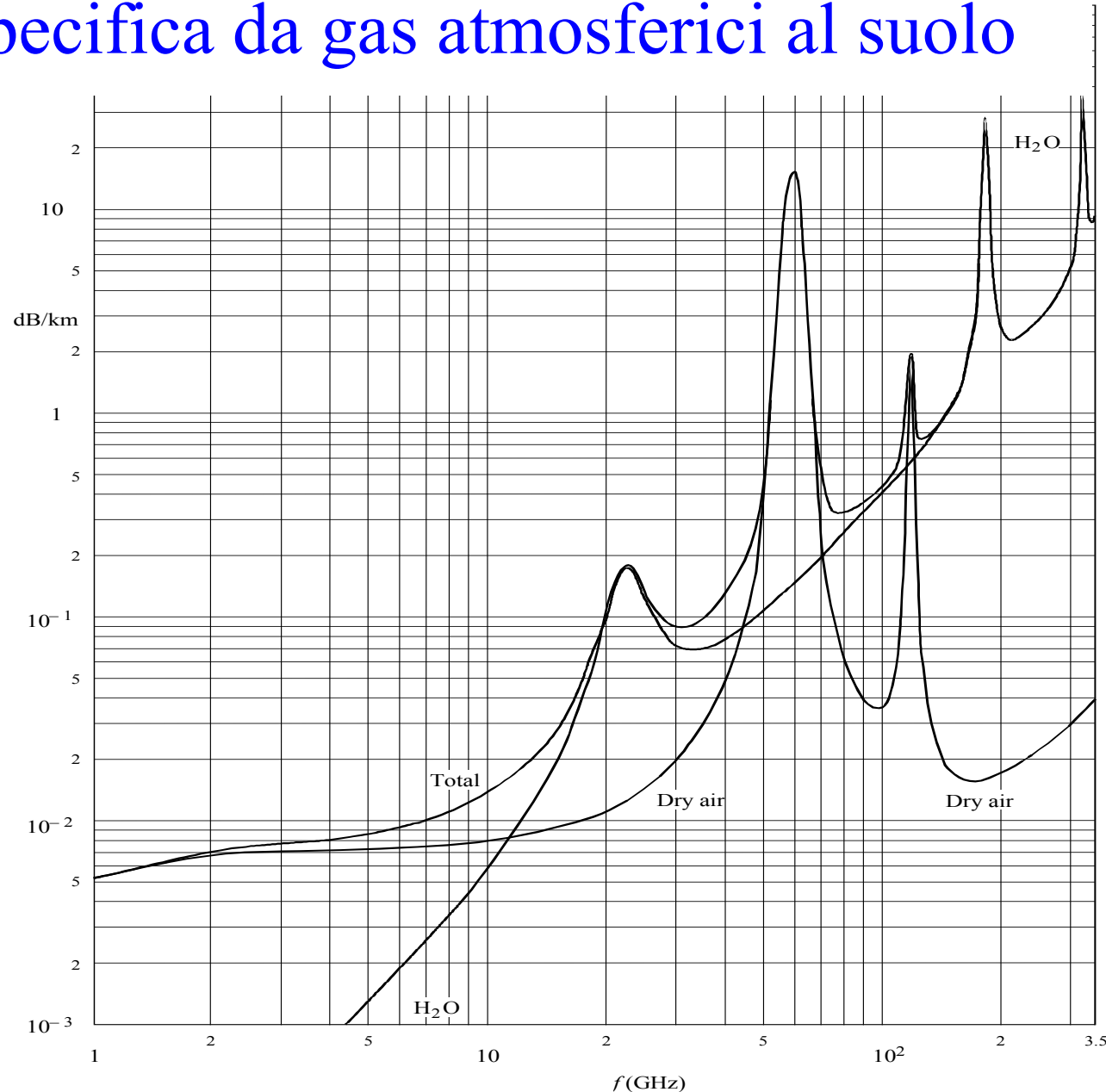
0.2 dB/km a 22 GHz

( $H_2O$ )

15 dB/km a 60 GHz ( $O_2$ )

Non si hanno effetti sotto i 10 GHz.

Il grafico si riferisce ad atmosfera standard



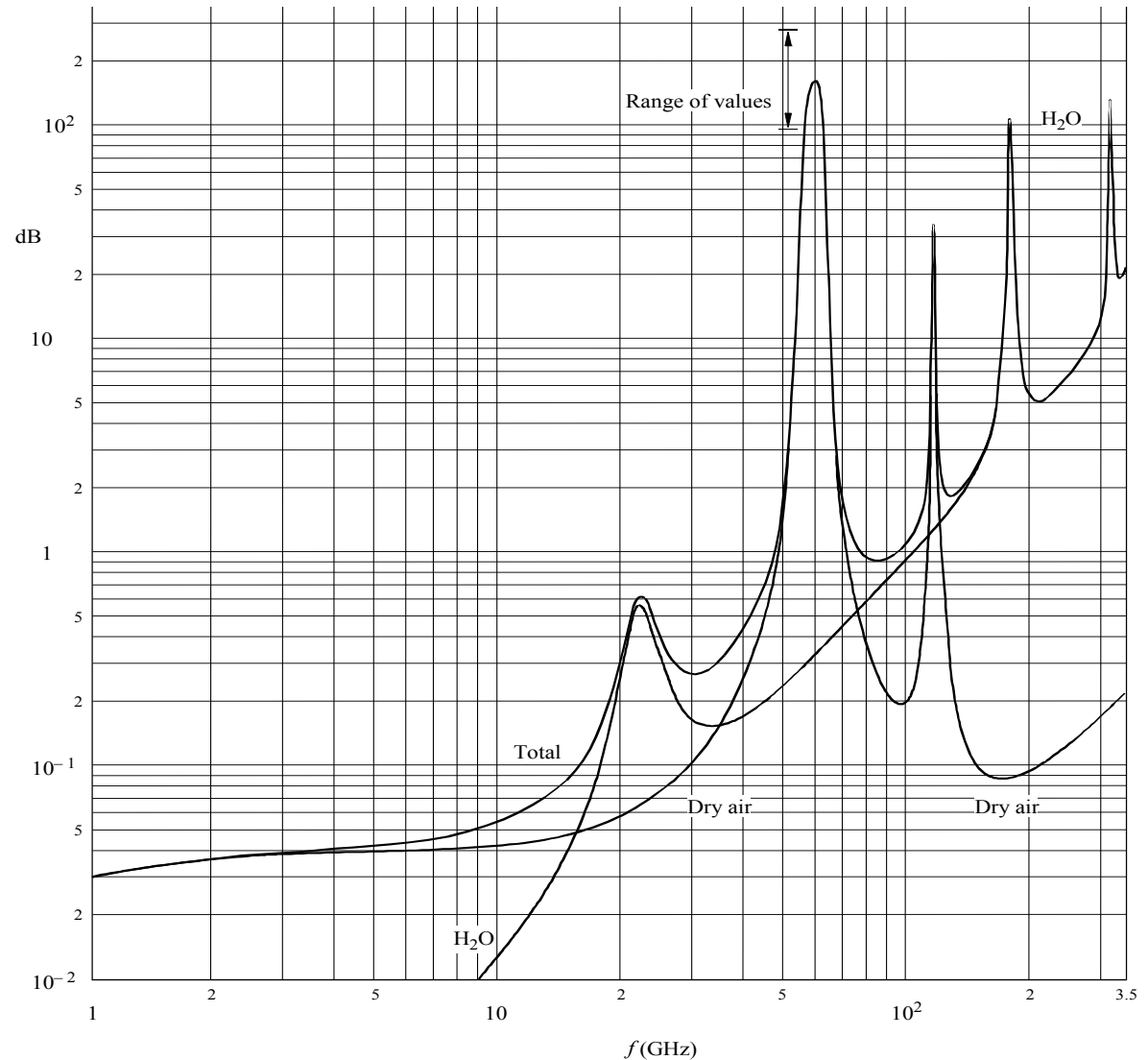
*(dB/km: percorso orizzontale a livello del mare)*



# Attenuazione da gas atmosferici (percorso verticale)

L'attenuazione dipende dalla inclinazione del collegamento

Il grafico a lato mostra la attenuazione totale nell'attraversamento dell'atmosfera verticale (per esempio per un collegamento satellitare con satellite geostazionario a 36000 km di quota)



*(attenuazione totale per attraversamento dell'atmosfera in verticale)*



# Calcolo della attenuazione supplementare da gas atmosferici ( $L_s$ ) (1/2)

Date le *attenuazioni specifiche* dovuta all'ossigeno,  $\alpha_o$  [dB/km], e al vapor d'acqua,  $\alpha_w$  [dB/km] che sono disponibili in funzione di frequenza e *parametri meteorologici*,  $L_s$  può essere calcolata semplicemente dividendo l'atmosfera in strati e specificando per ciascuno di essi il profilo dei parametri meteorologici pressione, temperatura e umidità lungo il percorso, e di conseguenza di  $\alpha_o$  e  $\alpha_w$ . Per collegamenti terrestri si ha:

$$L_s = \int_h^{h_{\max}} \frac{[\alpha_o(H) + \alpha_w(H)]}{\sin \Phi} dH$$

dove si è considerato un collegamento fra le quote  $h$  e  $h_{\max}$ , con un angolo di inclinazione (elevazione)  $\theta$  (piccolo) e dove  $\Phi$  è una funzione di  $\theta$ ,  $h$ , della distanza di tratta  $D$  e della variabile quota corrente  $H$ , la cui espressione, è:

$$\Phi = \arccos \left( \frac{(D+h) \cdot n(h) \cdot \cos \vartheta}{(D+H) \cdot n(H)} \right)$$



# Calcolo della attenuazione supplementare da gas atmosferici ( $L_s$ ) (2/2)

Quando il collegamento è praticamente parallelo al terreno si può pensare di trascurare le variazioni di  $\alpha_o$  e  $\alpha_w$ , e semplificare la formula in:

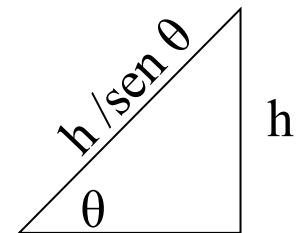
$$L_s = [\alpha_o + \alpha_w] D \quad (D \text{ in km!})$$

Si noti che all'attenuazione supplementare precedente va sommata quella di spazio libero per ottenere quella totale:

$$L_{TOT} = K + 20 \text{Log}(D) + L_s$$

Per collegamenti inclinati (es. con satellite) si possono utilizzare le *altezze equivalenti* [1] e utilizzare una formula simile alle precedenti:

$$L_s = \frac{[\alpha_o h_o + \alpha_w h_w]}{\sin \vartheta} \quad (\vartheta \geq 5^\circ)$$



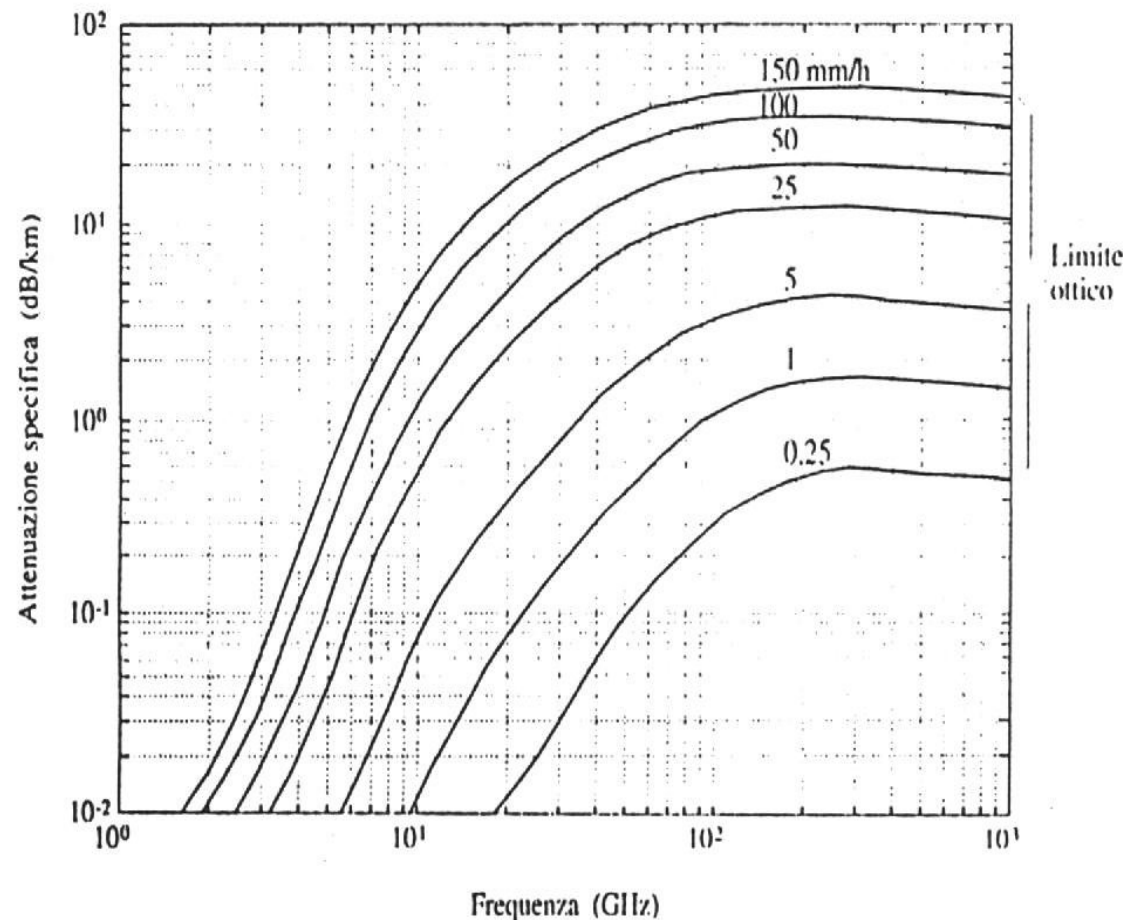
se fosse omogenea...



# Calcolo della attenuazione supplementare da Pioggia (1/3)

Si ha un processo di diffusione e assorbimento dell'onda elettromagnetica provocata dalla presenza delle gocce d'acqua: dipende dunque dalla loro forma, dal loro indice di rifrazione complesso e dalla loro distribuzione. Conseguenza è un' attenuazione del segnale.

Sulla base di valutazioni sperimentali sono stati ricavati i valori di attenuazione specifica,  $\alpha_R$ . L'andamento di  $\alpha_R$  è in funzione della frequenza per varie intensità di precipitazione R in mm/h: i grafici suppongono la sfericità delle gocce; in caso contrario si hanno variazioni di attenuazione a seconda del tipo di polarizzazione dell'onda incidente. La figura mostra come vi sia una crescita di attenuazione fino a circa 100 GHz e come, fissata la frequenza, i valori aumentino con R.



# Calcolo della attenuazione supplementare da Pioggia (2/3)

A fini pratici si ha la seguente relazione:

$$\alpha_R = KR^a$$

Dove “K” ed “a” sono due coefficienti che dipendono da frequenza, polarizzazione e da angolo di elevazione del radiocollegamento (ci sono tabelle ITU...).

La pioggia è un fenomeno aleatorio nel tempo, di conseguenza R è una variabile aleatoria, di cui si sono ricavate sperimentalmente distribuzioni statistiche. Siccome il fenomeno è ergodico si parla indifferentemente di tempo di servizio / fuori servizio o percentuale di servizio / fuori servizio o probabilità servizio / di fuori servizio. Se  $P_s$  è la probabilità di servizio, si può calcolare il  $P_s$ -esimo percentile  $R_x$  e quindi dalla formula il  $P_s$ -esimo percentile dell' attenuazione supplementare totale  $L_{sx}$ :

$$L_{sx} = KR_x^a D \quad (D \text{ in km!})$$



$$K = [K_H + K_V + (K_H - K_V) \cos^2 \vartheta \cos \tau] / 2$$

$$a = [K_H \alpha_H + K_V \alpha_V + (K_H \alpha_H - K_V \alpha_V) \cos^2 \vartheta \cos \tau] / 2$$

dove  $\theta$  è l'angolo di elevazione e  $\tau$  è l'angolo tra la direzione di polarizzazione e la direzione orizzontale (vale  $45^\circ$  per polarizzazione circolare) e i restanti parametri sono desumibili dalla tabella.

Frequency (GHz)	$k_H$	$k_V$	$a_H$	$a_V$
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
25	0.124	0.113	1.061	1.030
30	0.187	0.167	1.021	1.000
35	0.263	0.233	0.979	0.963
40	0.350	0.310	0.939	0.929
45	0.442	0.393	0.903	0.897
50	0.536	0.479	0.873	0.868
60	0.707	0.642	0.826	0.824
70	0.851	0.784	0.793	0.793
80	0.975	0.906	0.769	0.769
90	1.06	0.999	0.753	0.754
100	1.12	1.06	0.743	0.744



# Calcolo della attenuazione supplementare da Pioggia (3/3)

Ci sono tabelle ITU di  $R_x$  in funzione della probabilità di fuori servizio  $P_x=1-P_s$ . ad esempio per la zona K che comprende gran parte dell' europa meridionale si ha:

$P_x$	$R_x$
1.0	2
0.3	6
0.1	12
0.03	23
0.01	42
0.003	70
0.001	100

Si possono avere procedure più precise conoscendo le variazioni di R nello spazio (dimensione delle celle temporalesche) e nel tempo (stagione , mese). All' occorrenza si consulteranno gli opportuni documenti ITU.

## Bibliografia

- [1] Rec. ITU-R P.676 “Attenuation by atmospheric gases”



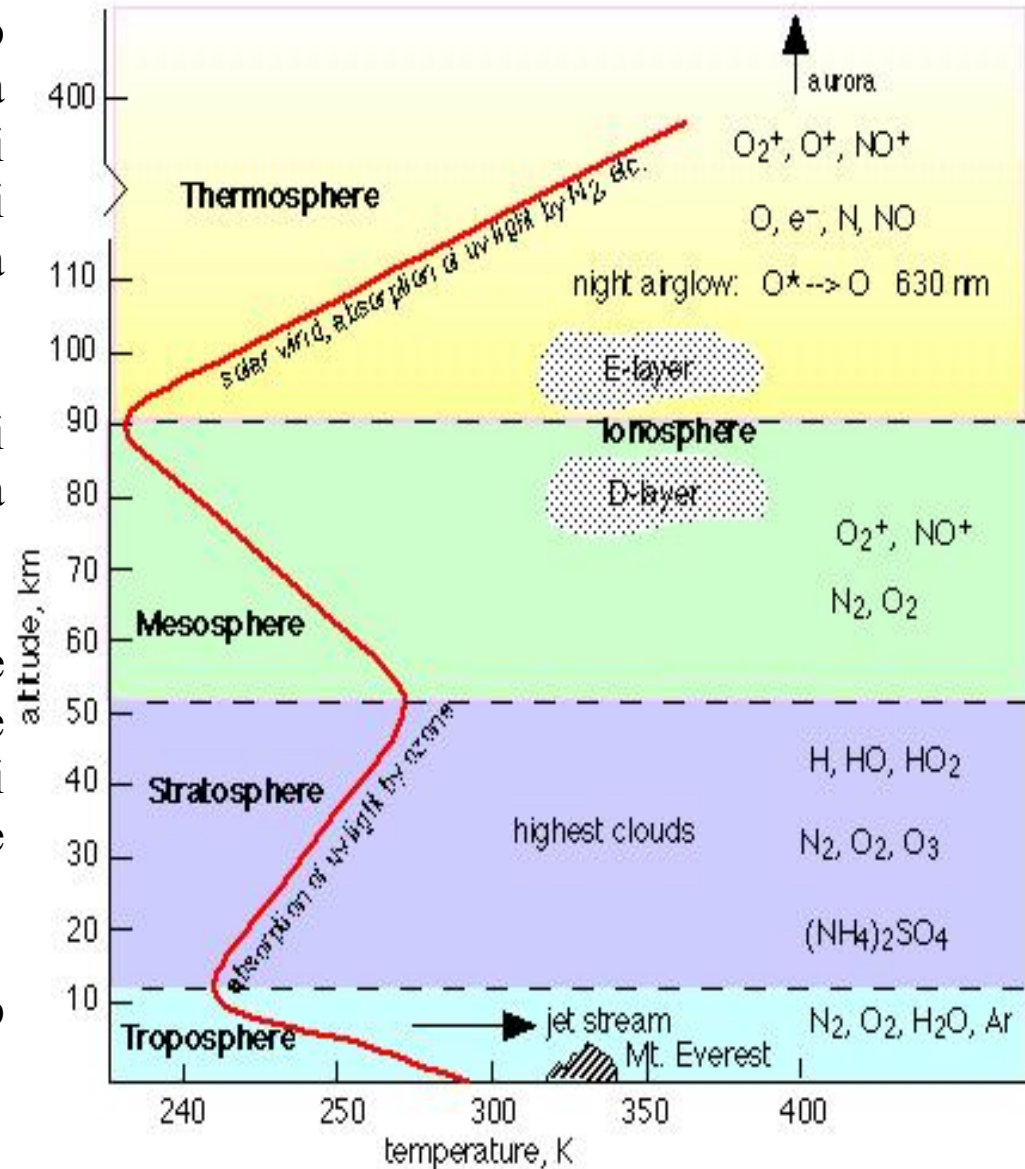
# Effetto della ionosfera (1/4)

La Ionosfera è quello strato dell'atmosfera che sta approx. Da 50 a 400 km di quota e in cui le radiazioni solari ionizzano le molecole: i gas si separano in ioni ed elettroni liberi, si ha cioè un plasma

A causa del campo magnetico terrestre si ha una interazione con gli ioni che genera anisotropia elettromagnetica

Nel seguito questa verrà comunque trascurata e si supporrà che le uniche cariche libere siano gli elettroni (gli ioni hanno massa molto maggiore e minore mobilità)

Si ha una certa densità di ionizzazione  $N_p$  ( $n^\circ$  di elettroni /  $m^3$ )



## Effetto della ionosfera (2/4)

Se  $\mathbf{u}$  è la velocità ed “e” la carica dell’ elettrone, la densità di corrente vale:

$$\bar{\mathbf{J}}(t) = eN_p \bar{\mathbf{u}}(t)$$

inoltre la velocità delle cariche deve soddisfare la legge della meccanica (F=ma):

$$m \frac{d\bar{\mathbf{u}}(t)}{dt} = e\bar{\mathbf{E}} \quad \rightarrow \text{in regime armonico} \quad \rightarrow m j\omega \bar{\mathbf{u}} = e\bar{\mathbf{E}}$$

con:  $e = -1.6 \cdot 10^{-19}$  [C] ed  $m = 9.1 \cdot 10^{-31}$  [kg]

Si ha quindi

$$\bar{\mathbf{J}} = \frac{e^2 N_p}{m} \frac{\bar{\mathbf{E}}}{j\omega}$$

Sostituendo nella prima eq. di Maxwell si ha:

$$\nabla \times \bar{\mathbf{H}} = j\omega\epsilon_0 \bar{\mathbf{E}} + \bar{\mathbf{J}} = j\omega\epsilon_0 \left( 1 - \frac{e^2 N_p}{m\epsilon_0 \omega^2} \right) \bar{\mathbf{E}}$$



# Effetto della ionosfera (3/4)

Si ha cioè una nuova permittività elettrica reale (priva di perdite) pari a:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{e^2 N_p}{m \varepsilon_0 \omega^2} \right)$$

E quindi un indice di rifrazione:

$$n_p = \sqrt{\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}} = \sqrt{1 - \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^2} \quad \text{con} \quad \omega_p = \sqrt{\frac{e^2 N_p}{m \varepsilon_0}} \quad (\text{pulsazione di plasma})$$

La costante di fase in questo mezzo sarà:

$$\beta^{\Delta} = \omega n_p \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^2} \quad \vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_o(\vartheta, \varphi) \frac{e^{-j\beta r}}{r}$$

Onda sferica



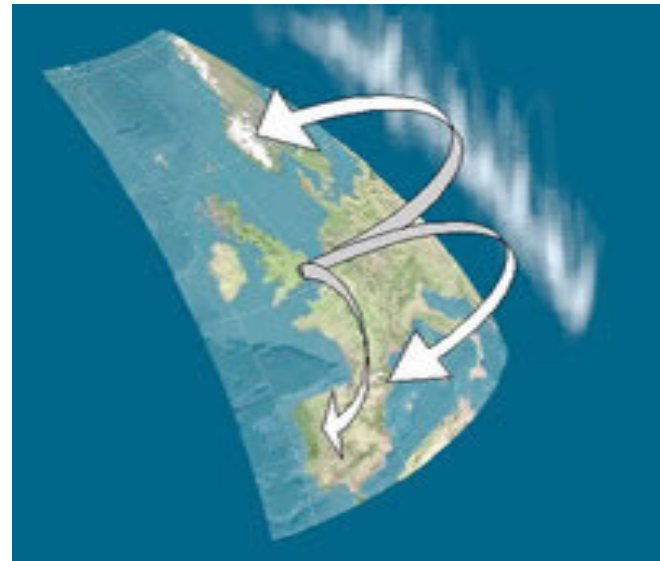
# Effetto della ionosfera (4/4)

Perciò se  $\omega < \omega_p$  si ha una quantità immaginaria. In termini di propagazione dell'onda questo corrisponde ad una attenuazione esponenziale, che nel caso di un mezzo non dissipativo come questo corrisponde ad una riflessione continua all'indietro dell'onda incidente mentre essa si propaga nel plasma.

Con i valori in gioco delle costanti è necessario che la frequenza sia minore di alcune decine di MHz. La ionosfera cioè ha un effetto reiettivo, riflette l'onda incidente se essa ha una frequenza sufficientemente bassa.

Questo fenomeno, causa riflessioni multiple su Ionosfera e sulla superficie terrestre permette di raggiungere zone molto distanti che apparentemente sarebbero ostruite dalla curvatura della superficie della terra (ellissoide terrestre)

Grazie a questo fenomeno Marconi riuscì a trasmettere attraverso l'atlantico nel dicembre 1901 tra Poldhu (Cornovaglia) e l'isola di Saint John (Canada), e nel 1903 fino a Cape Cod (vicino Boston).



# Troposcatter

“*To scatter*” significa diffondere in tutte le direzioni un’ onda.

A frequenze dell’ ordine del GHz (~100 Mhz-10Ghz, ove l’ effetto della ionosfera non è rilevante) le disomogenità della troposfera possono causare retrodiffusione di un’ onda incidente in tutte le direzioni. Ad esempio nuvole, zone a maggiore o minore densità dovute al vento o a componenti dell’ atmosfera, ecc. causano il **troposcatter**.

Siccome la disomogenità si trova a quota relativamente elevata, si genera un’ onda di cielo che porta il segnale proveniente da un trasmettitore su un’ area molto vasta della superficie terrestre, molto più vasta di quanto preventivato assumendo atmosfera omogenea.

A volte l’ effetto è voluto per trasmettere al di là di catene montuose o della curvatura della terra. Occorre che nel “common volume” ci sia qualche disomogenità, ma questo è quasi sempre verificato...

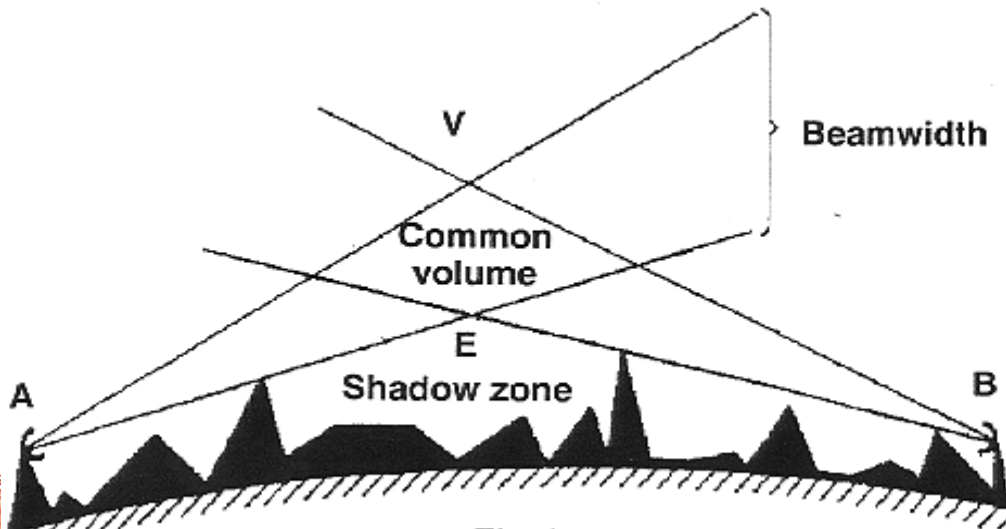


Fig. 1

