

A.R.I.

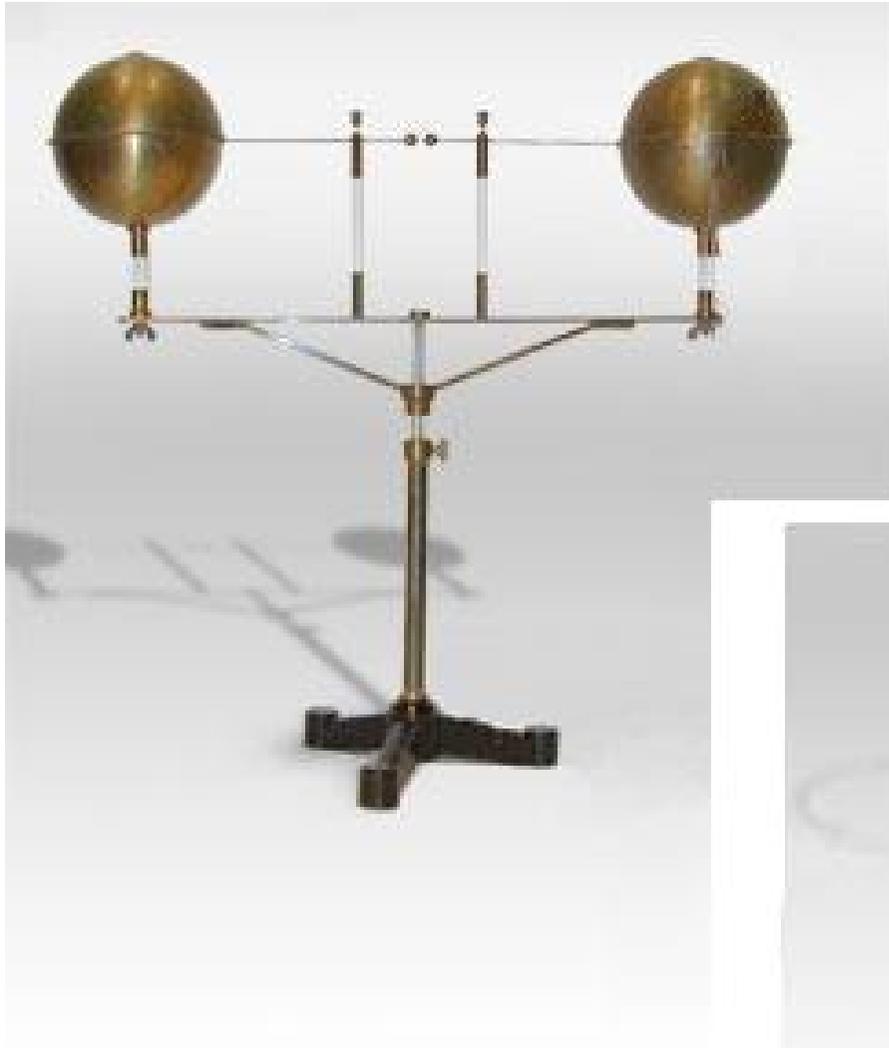
Sezione di Parma

Conversazioni del 1° Venerdì del Mese

# PROPAGAZIONE TROPOSFERICA

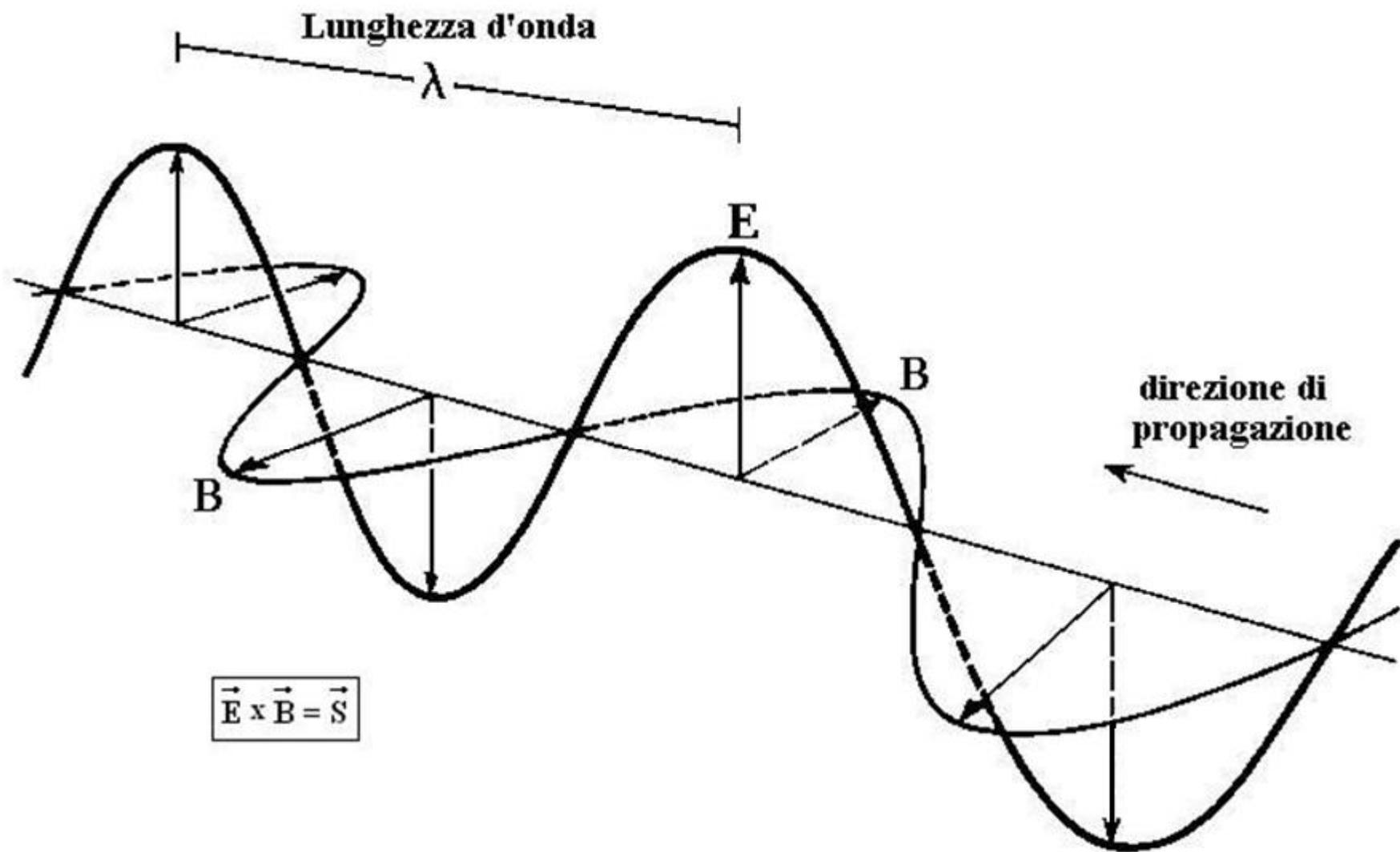
Venerdì, 7 settembre , ore 21:15 -

Carlo, I4VIL



Oscillatore e risuonatore di Hertz

( <http://www.sparkmuseum.com> )



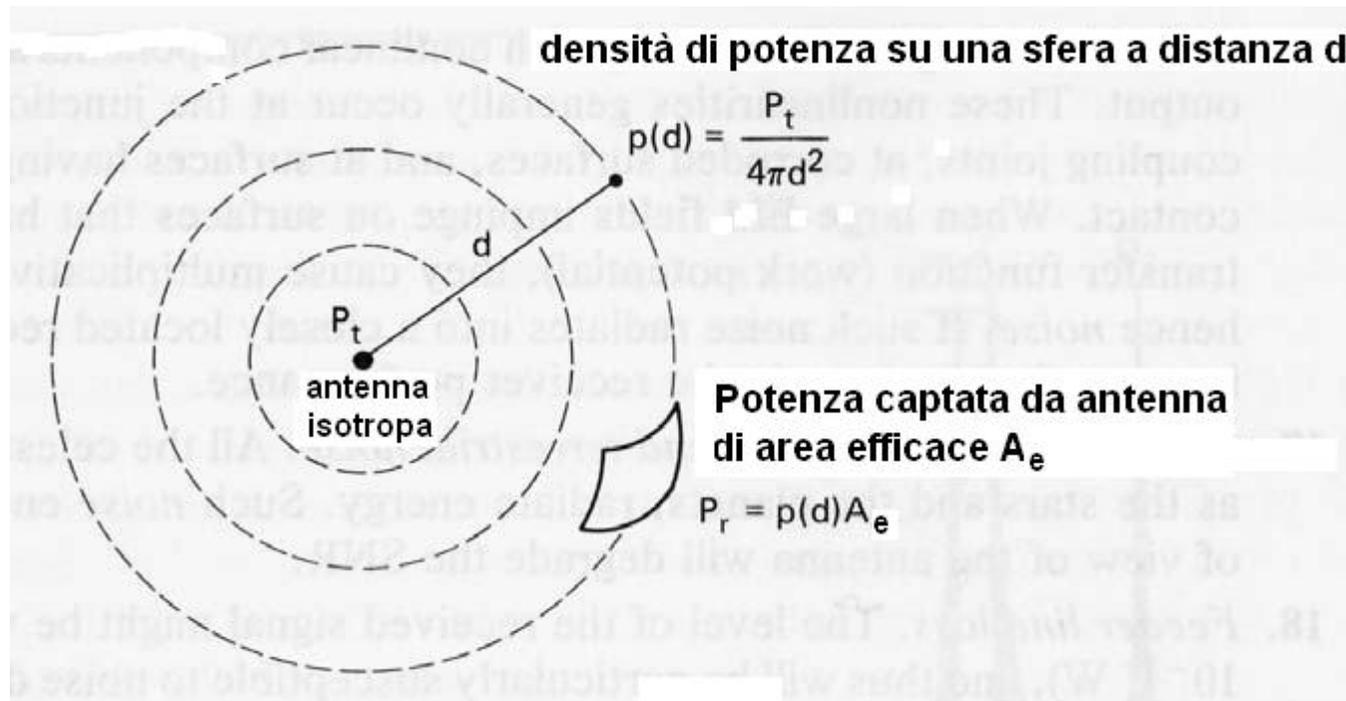
$$\vec{E} \times \vec{B} = \vec{S}$$

## ONDA ELETTROMAGNETICA

	polarizzazione lineare		polarizzazione circolare		
	H	V	RHCP	LHCP	
polarizzazione ANTENNA	orizzontale	0	$\infty$	3	3
verticale	$\infty$	0	3	3	3
circolare dx	3	3	0	$\infty$	$\infty$
circolare sx	3	3	$\infty$	0	0

**Attenuazione (in dB) da mismatching di polarizzazione**

# Densità di potenza e potenza ricevuta



# Area efficace $A_e$

-L'area efficace di un'antenna è definita come il rapporto tra la potenza estratta e la densità di flusso incidente

-L'area efficace di un'antenna è data dalla sua area fisica ( $A_f$ ) moltiplicata per un coefficiente (efficienza  $\eta$ ) che tiene conto del fatto che non tutta la potenza incidente viene estratta a causa di vari meccanismi di perdita.

$$A_e = \eta A_f$$

-Per le antenne a paraboloide valori tipici di  $\eta$  sono attorno 0,5.

# Area efficace e guadagno

L'area efficace e' legata al guadagno dalla relazione:

$$\frac{A_e}{G} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Per un riflettore parabolico, l'area efficace è legata all'area fisica dalla relazione:

$$A_e = \eta \pi D^2/4$$

# Potenza ricevuta

La potenza ricevuta (free space) è data da:

$$P_r = \frac{P_t}{4 \pi d^2} \cdot G_t \cdot A_e$$

La propagazione delle onde radio da un'antenna trasmittente ad una ricevente può avvenire in diversi modi:

- onda di superficie (*ground wave*)
- onda ionosferica (*sky wave*)
- onda troposferica (*space wave*)
- diffusione troposferica (*scattering*)
- satellite per telecomunicazione (*satellite communication*)

# Troposfera:

parte inferiore della atmosfera terrestre, dal suolo all'inizio della tropopausa, caratterizzata da temperatura che diminuisce con la quota.

Altezza tipica 10÷15 km.

Nella troposfera i campi e.m. subiscono attenuazioni supplementari rispetto alla propagazione libera, a causa di:

- Rifrazioni causate dalla troposfera
- Diffrazioni per irregolarità della superficie terrestre
- Riflessioni della superficie terrestre (montagne, etc.)
- Diffusione da irregolarità nella densità
- Fenomeni meteorici : pioggia, gas, nebbia, neve, etc

## **PROPAGAZIONE TROPOSFERICA (SPACE WAVE)**

- Utilizzata nelle VHF, UHF e microonde. Tali frequenze hanno forte attenuazione come onda di superficie, e non sono riflesse come onde ionosferiche
- Si realizzano normalmente collegamenti a portata ottica.
- Si cerca di evitare gli effetti dovuti alla presenza del suolo, elevando le antenne ed usando antenne direttive ad alto guadagno.
- E' essenziale studiare le condizioni fisiche della troposfera come l'andamento dell'indice di rifrazione dei bassi strati.

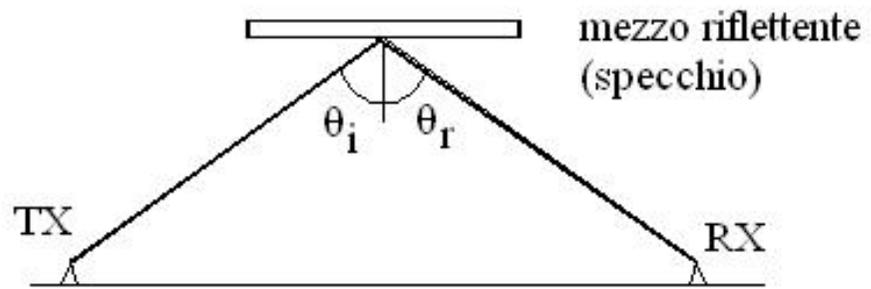
E' stato Guglielmo Marconi che ha osservato sperimentalmente per primo il tropospheric scattering nel 1932 in microonde.

In the paper delivered before the Royal Institution of Great Britain on December 2, 1932, Marconi said [\*]:

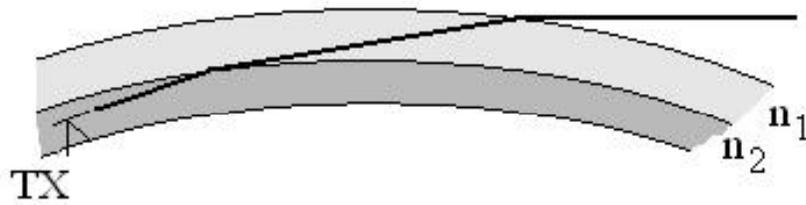
*These tests demonstrated that although the optical distance corresponding to the small height of the Santa Margherita Station and the yacht "Elettra" was only 14.6 nautical miles, the signals were still perceivable at a distance of 28 miles, consequently well beyond the optical range and notwithstanding the intervening curvature of the earth.*

*..... In regard to the limited range of propagation of these microwaves, the last word has not yet been said*

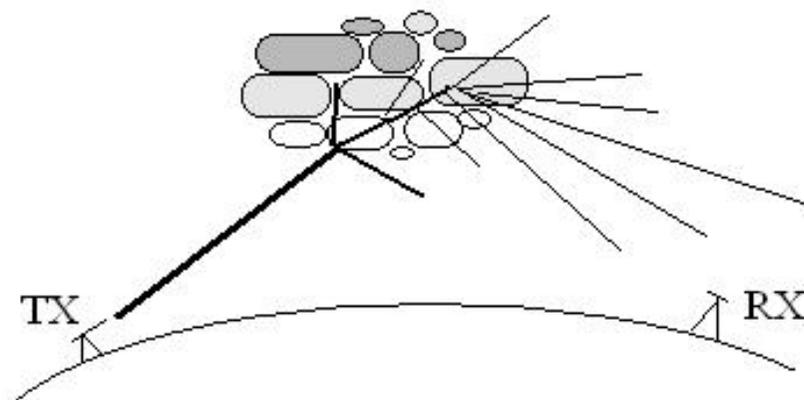
[\*] H. E. M. Marconi, "Radio communications by means of very short electric waves," **Marconi Rev.**, no. 39, pp. 1-6, Nov.-Dec. 1932, and no. 40, pp. 1-12, Jan.-Feb. 1933. (Reprinted in **IRE Trans. Antennas Propagat.**, vol. **AP-5**, no. 1, pp. 90-99, Jan. 1957.)



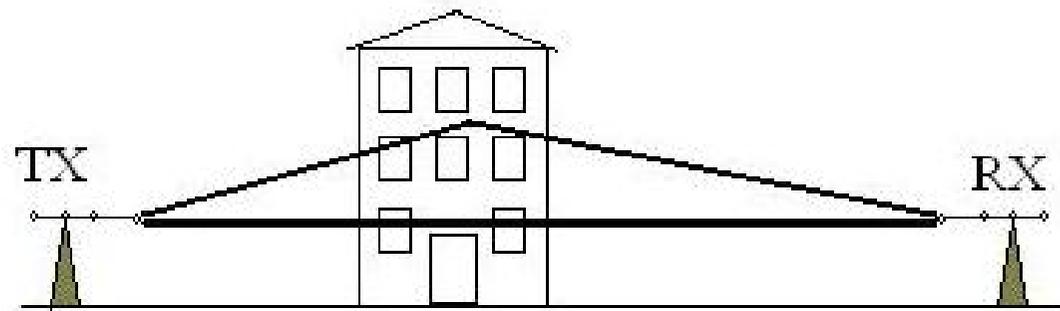
RIFLESSIONE



RIFRAZIONE



DIFFUSIONE



## INTERFERENZA



almeno due differenti percorsi

- La troposfera può essere caratterizzata, ai fini elettromagnetici, con un indice di rifrazione relativo  $n$  che è funzione delle grandezze che caratterizzano l'atmosfera: temperatura, pressione e contenuto di vapore d'acqua:
- In condizioni "standard" l'indice di rifrazione vale:

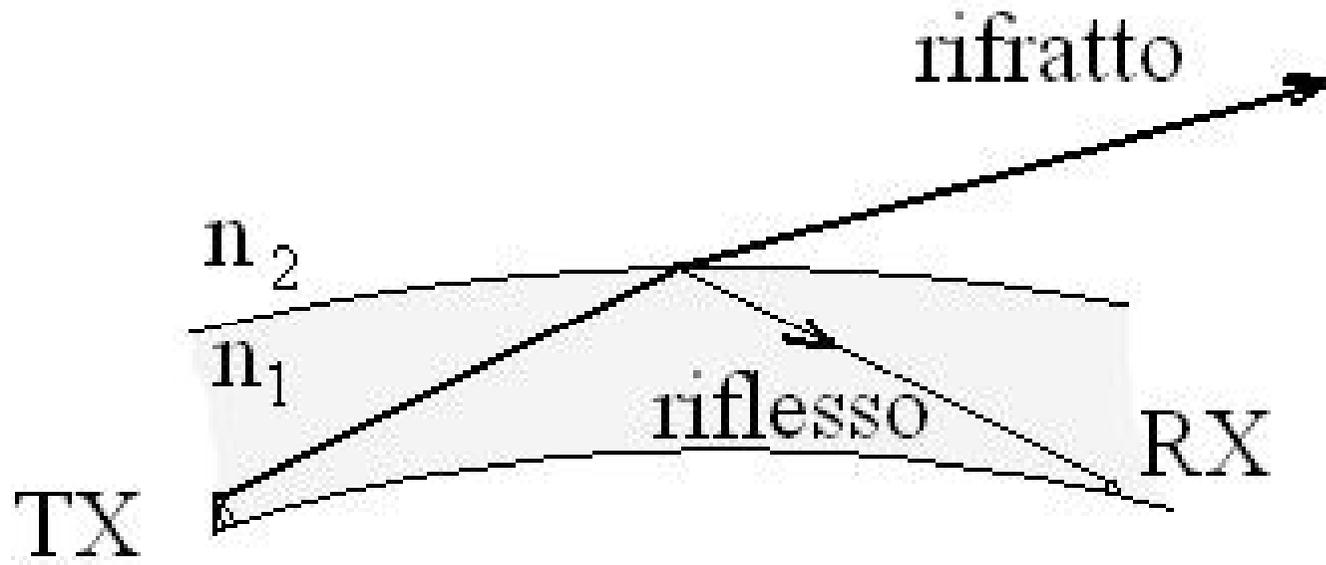
$$n = 1 + \frac{A}{T} \left( P_a + 4810 \frac{P_e}{T} \right) 10^{-6}$$

dove:  $A = 77.7$  [K/mbar]                       $T =$  temperatura [K]

$P_a =$  pressione atmosferica totale [mBar]

$P_e =$  pressione parziale vapore d'acqua [mBar]

# Rifrazione e riflessione

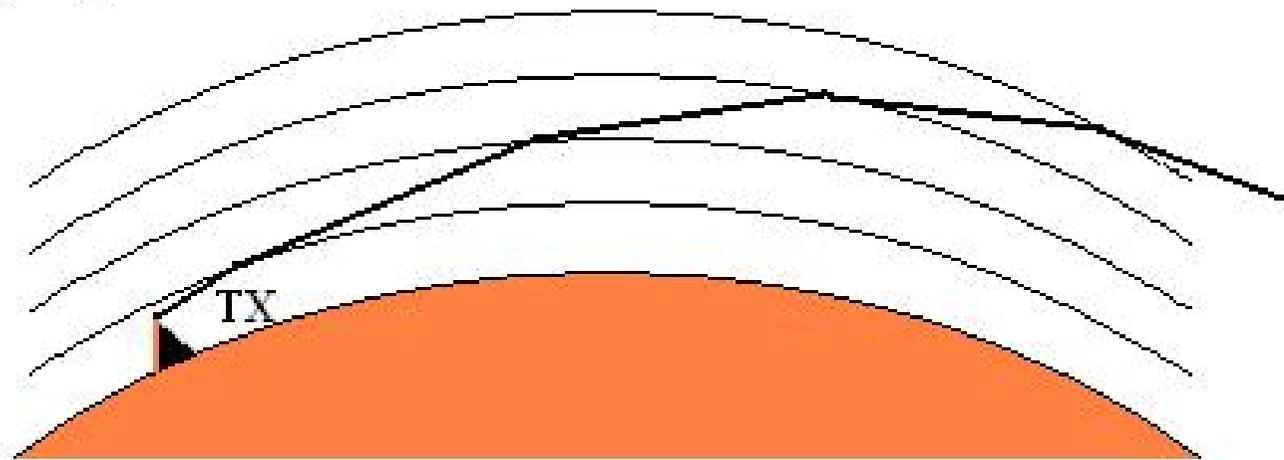
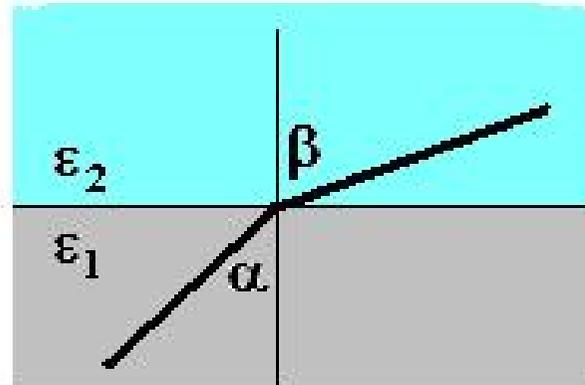


# RIFRAZIONE TROPOSFERICA

$$n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$$

$$n_2 = \sqrt{\epsilon_2}$$

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}$$



Molto usata anche la :

$$n = 1 + N \cdot 10^{-6}$$

avendo definito  $N = (n - 1)10^6$  **radiorifrattività** che è più facilmente tabulata e che viene espressa mediante unità adimensionali dette unità N [1].

L'indice di rifrazione relativo  $n$  e la rifrattività  $N$  sono funzioni dell'altezza  $h$  .

[1] Rec. ITU-R P.310 “Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media”

## Rifrazione in atmosfera standard

In atmosfera standard la rifrazione curva la traiettoria verso il basso e permette di raggiungere località poste sotto l'orizzonte ottico.

Per comodità si può pensare alla traiettoria ancora rettilinea su una superficie terrestre di minore curvatura, ovvero di raggio terrestre equivalente più grande pari a  $R = 4 R_0$ .

Si fa riferimento anche all'indice troposferico  $K$  definito come:

$$k = \frac{R}{R - R_0} \quad \text{normalmente :} \quad k = \frac{4}{3}$$

# RIFRAZIONE

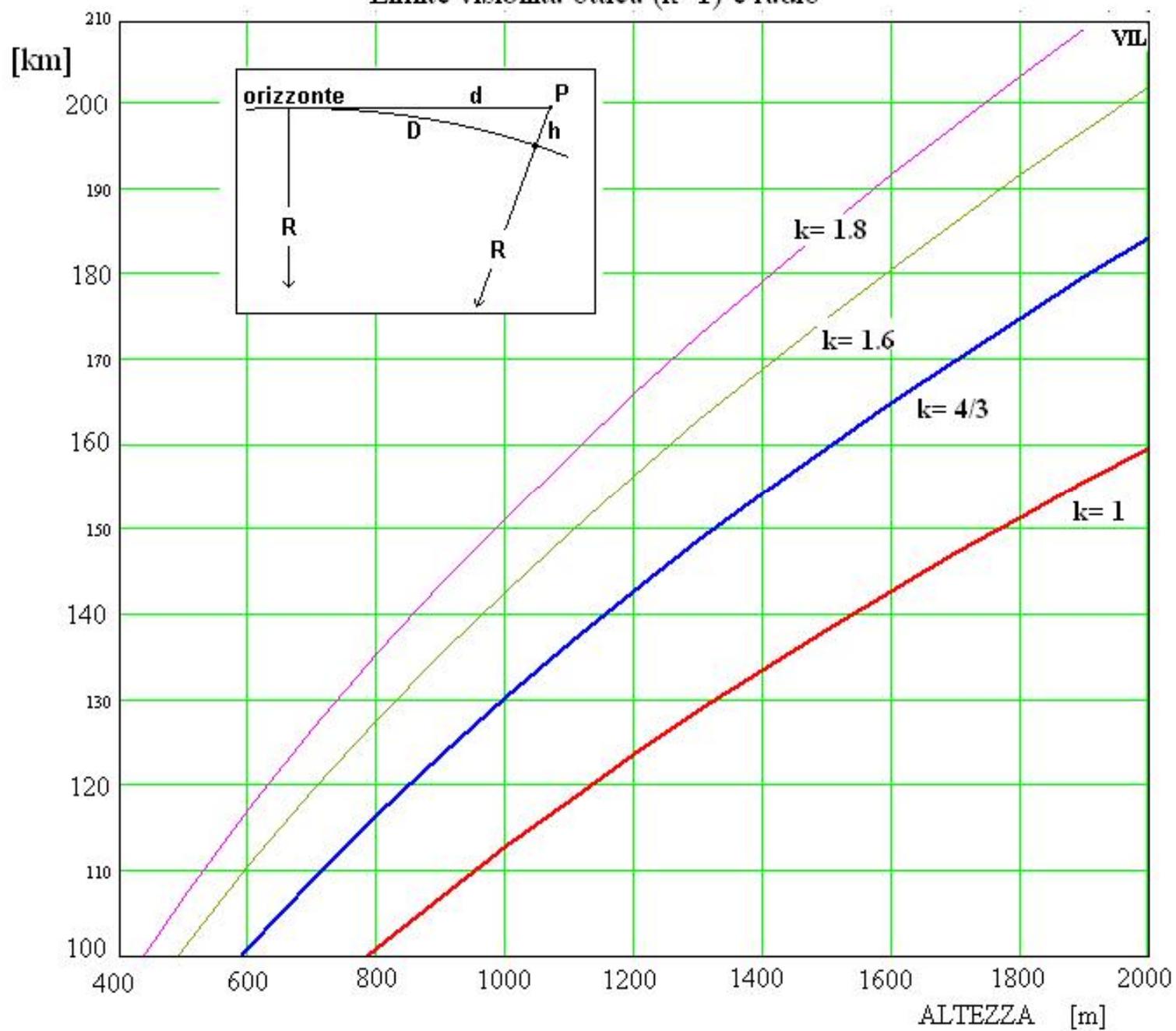
Misurando la differenza  $\Delta N$  tra l'indice di rifrazione misurato a 1000 metri di altezza e il valore al suolo, si ottiene che il fattore di curvatura  $K$  è, dato, approssimativamente da:

$$k = \frac{1}{1 + 6.37 \Delta N 10^{-3}}$$

Poiché i valori  $\Delta N$  sono generalmente negativi, i valori di  $k$  risultano maggiori dell'unità, normalmente.

In Italia, ad eccezione delle zone costiere, i valori di  $\Delta N$  non si discostano molto, normalmente, da  $\Delta N = -40$  unità  $N$ , cui corrisponde un valore di  $k = 4/3$ .

Limite visibilità ottica ( $k=1$ ) e radio



# DIFFRAZIONE

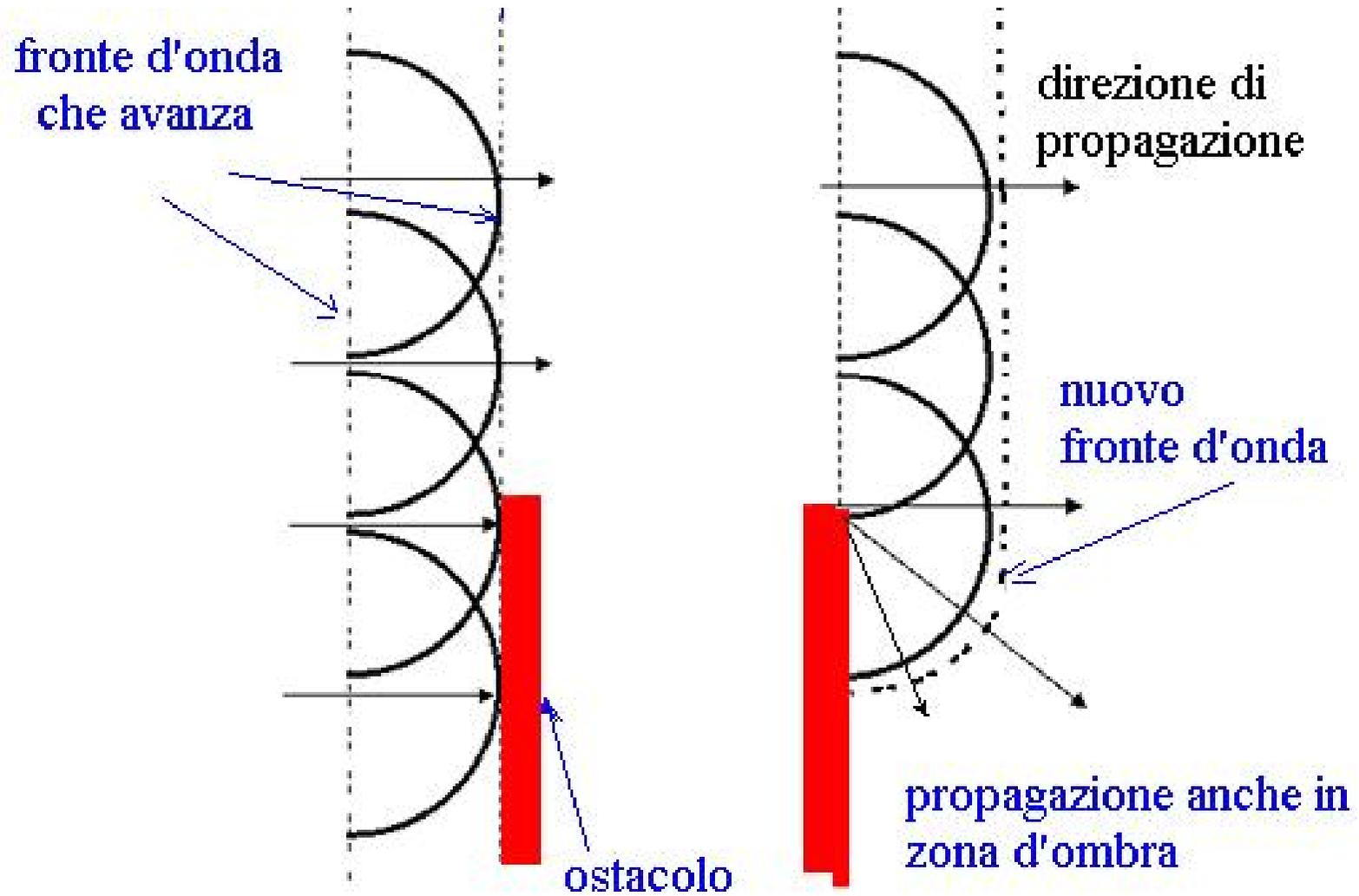
La **diffrazione** è un fenomeno associato alla deviazione della traiettoria di propagazione delle onde quando queste incontrano un ostacolo sul loro cammino; gli effetti sono rilevanti quando lo spessore dell'ostacolo è confrontabile con la lunghezza d'onda. La diffrazione da un ostacolo a lama di coltello può essere facilmente compresa col principio di Huygens-Fresnel, che stabilisce che un ostacolo netto per un'onda elettromagnetica si comporta come una nuova sorgente creando un nuovo fronte d'onda.

Usando la costruzione di Huygens:

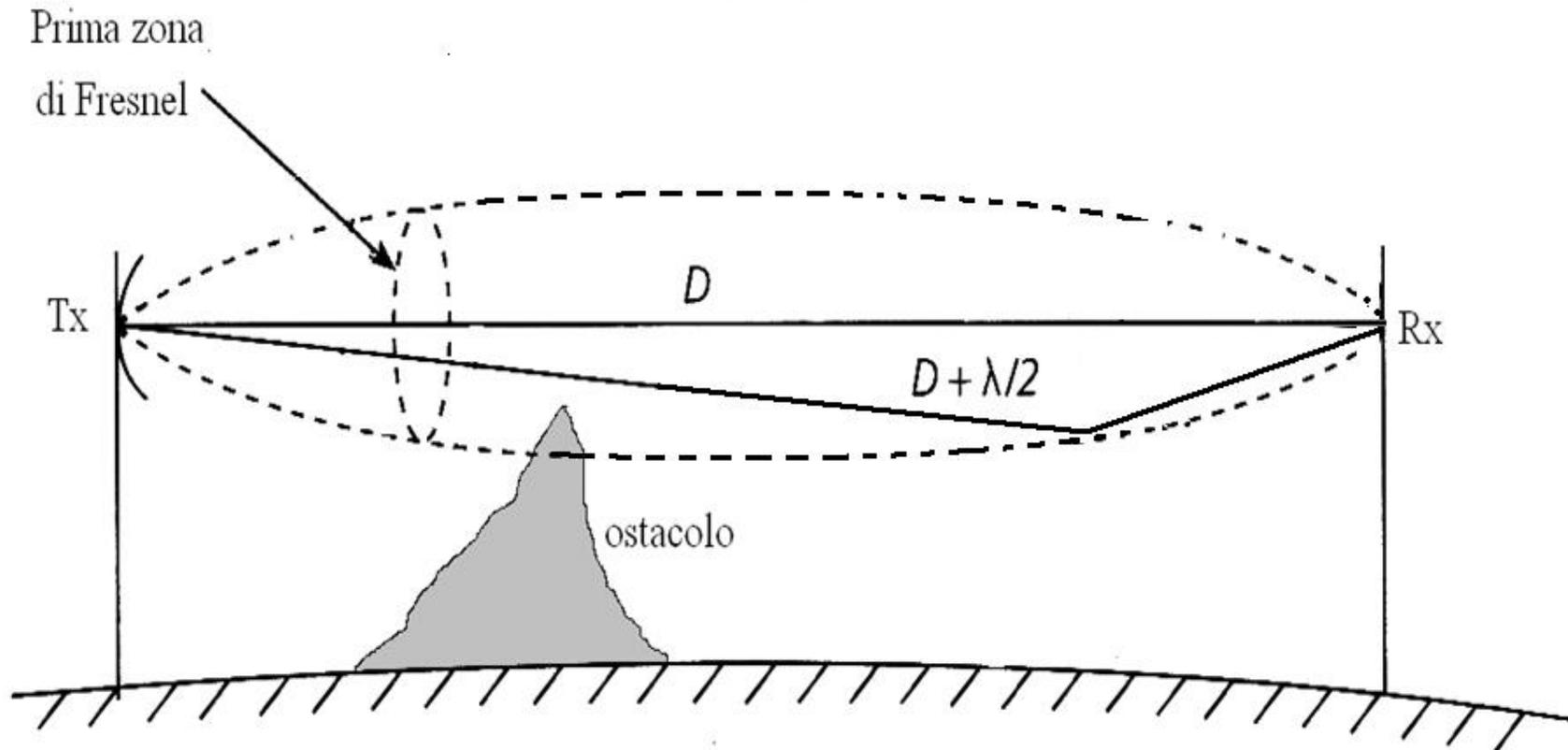
“Each point on a wavefront acts as a source of secondary wavelets. The combination of these secondary wavelets produces the new wavefront in the direction of propagation”.

**Christiaan Huygens (1629–1695).**

# DIFFRAZIONE



## Ellissoide (1°) di Fresnel

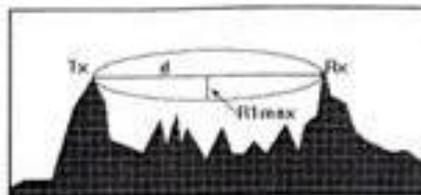


Luogo dei punti per i quali la somma delle distanze dalle antenne TX ed RX è pari a  $\lambda/2$ .

La 1° zona di Fresnel è la regione dove la differenza tra il cammino più corto (diretto) ed il cammino che tocca il bordo dell'ellissoide è  $\lambda/2$ .

Tutti questi cammini portano ad avere un segnale che si somma all'antenna ricevente (escursione di fase massima tra i cammini è  $\pm 90^\circ$ ).

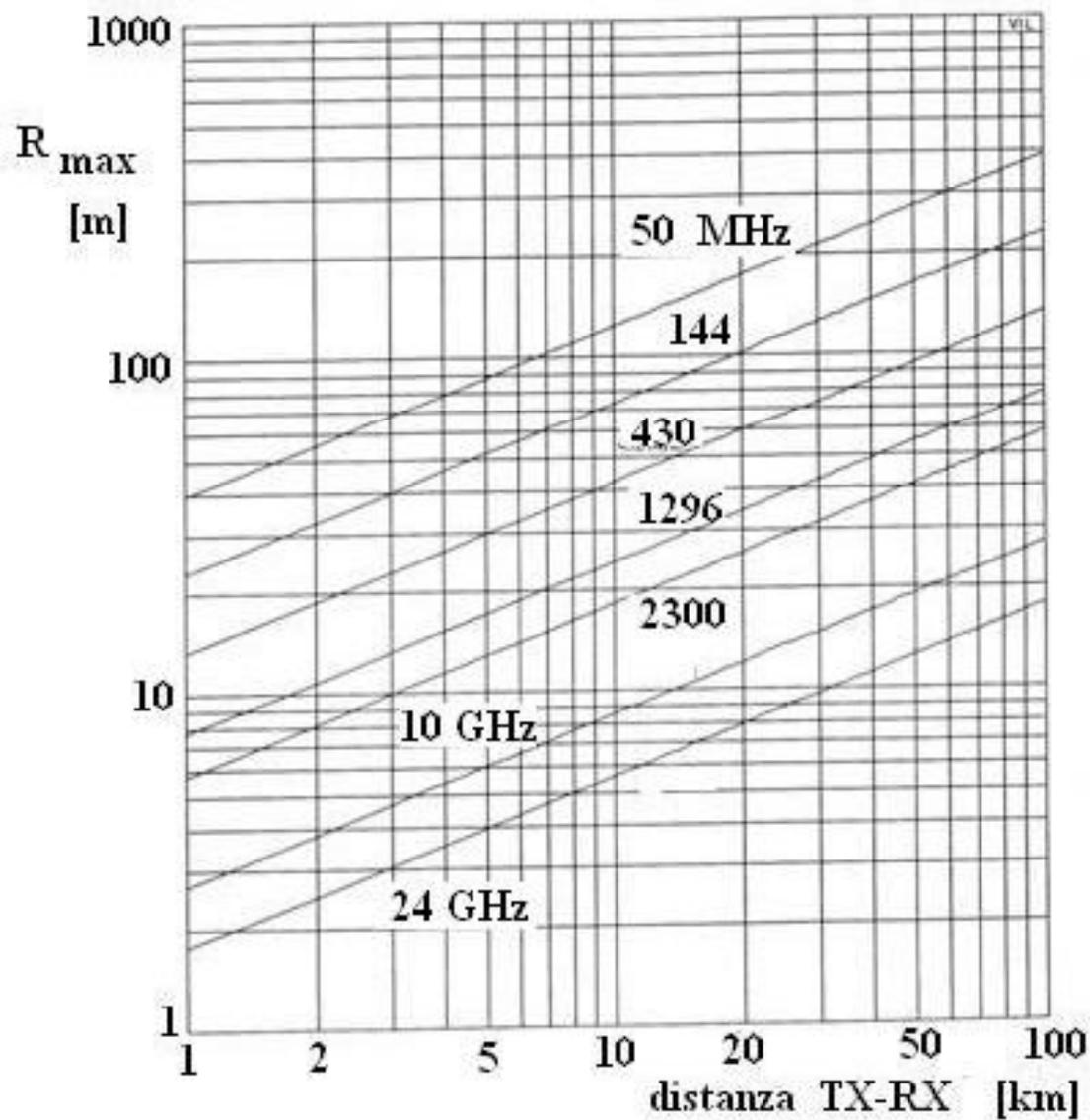
RAGGIO MAX. DEL 1° ELLISSOIDE DI FRESNEL



$d = \text{distanza Tx-Rx}$

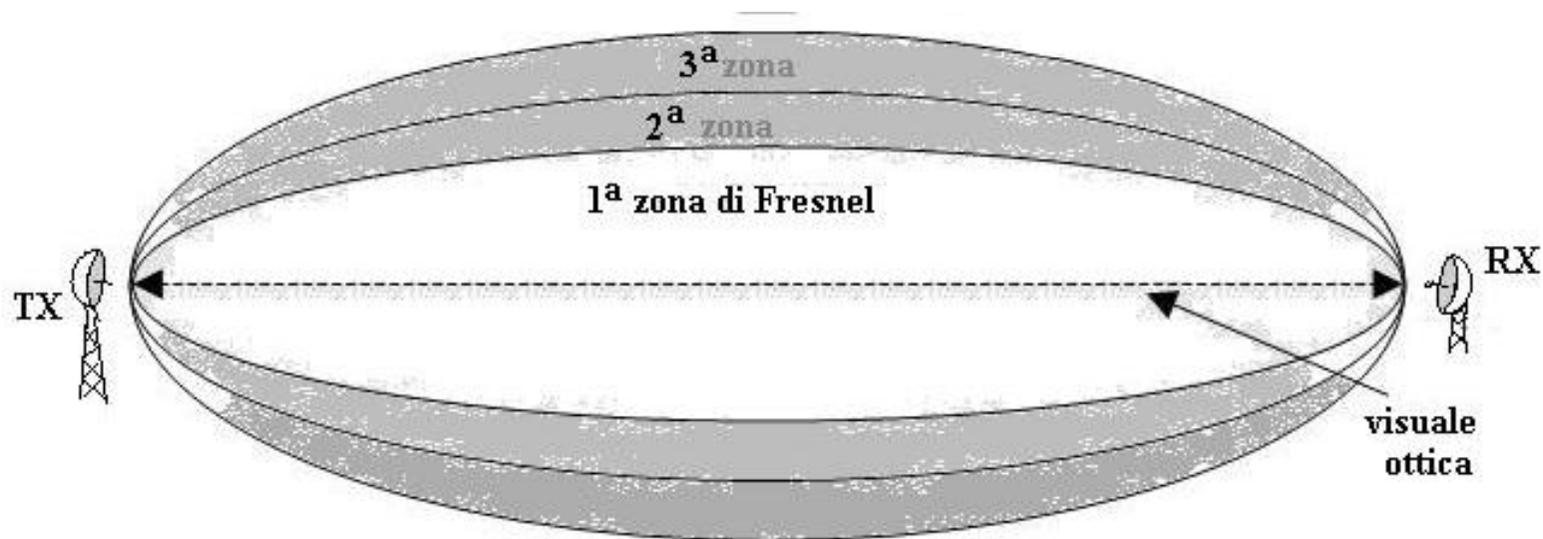
$$\lambda = \frac{300}{f}$$

$$R_{1\text{max}} = \sqrt{\lambda \cdot \frac{d}{4}}$$



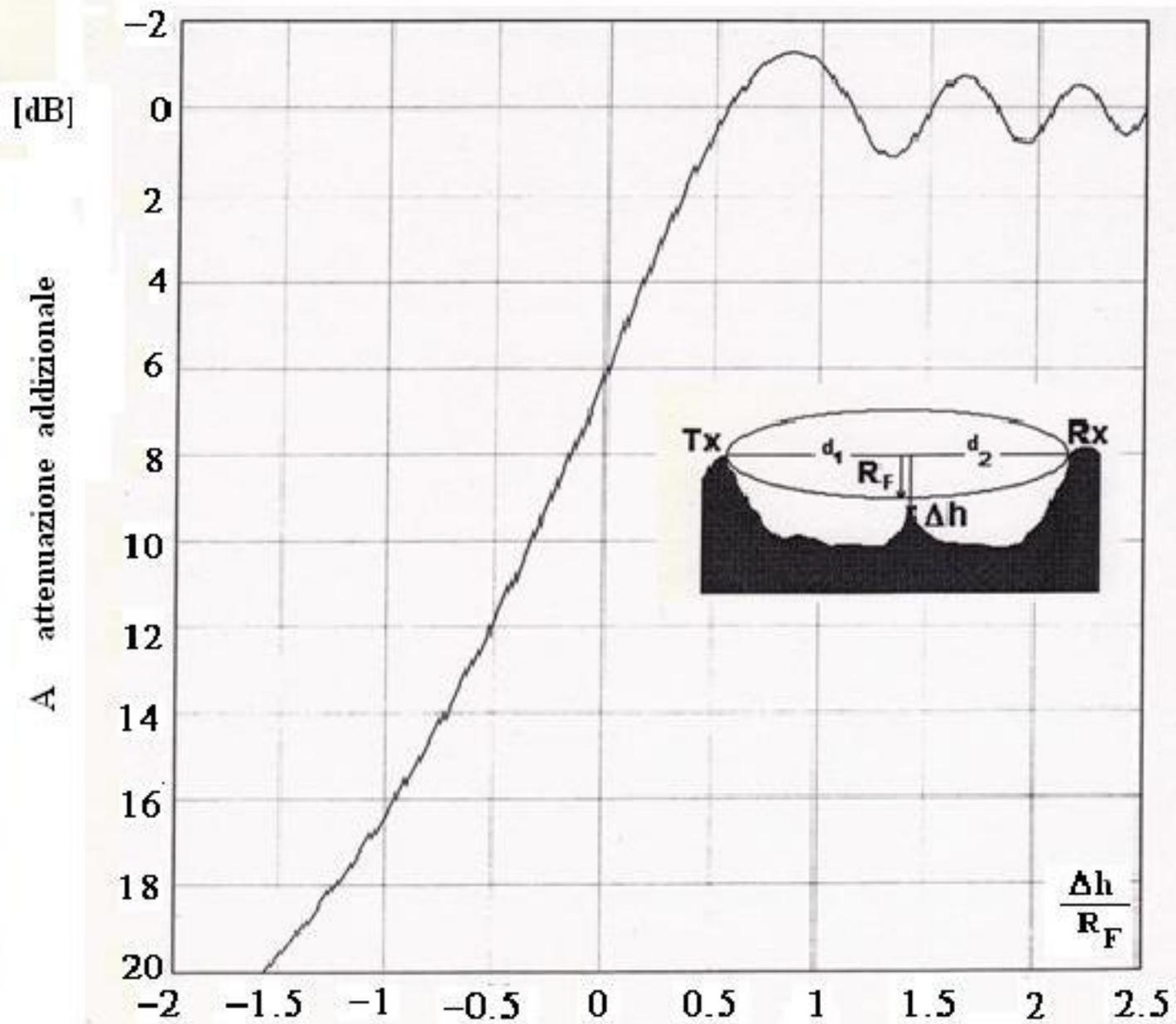
RAGGIO MAX.  
DEL 1° ELLISSOIDE  
DI FRESNEL

Il campo totale all'antenna ricevente è dato dalla somma di tutti i contributi dei vari percorsi provenienti dalle varie zone di Fresnel (la 2<sup>a</sup> zona di Fresnel è limitata, all'interno dalla 1<sup>a</sup> zona di Fresnel, e, all'esterno, dall'ellissoide con differenza di cammino  $2 \lambda/2$ , e così via per le m<sup>e</sup> zone di Fresnel). I cammini che interessano la 2<sup>a</sup> zona di Fresnel portano a contributi che, al ricevitore, si sottraggono rispetto ai contributi provenienti dalla 1<sup>a</sup> zona. I contributi delle zone *dispari* e delle zone *pari*, si sottraggono, infatti, tra loro. Fortunatamente decrescono di ampiezza al crescere dell'ordine m ed il contributo netto è dovuto, per gran parte, alla 1<sup>a</sup> zona dei Fresnel.

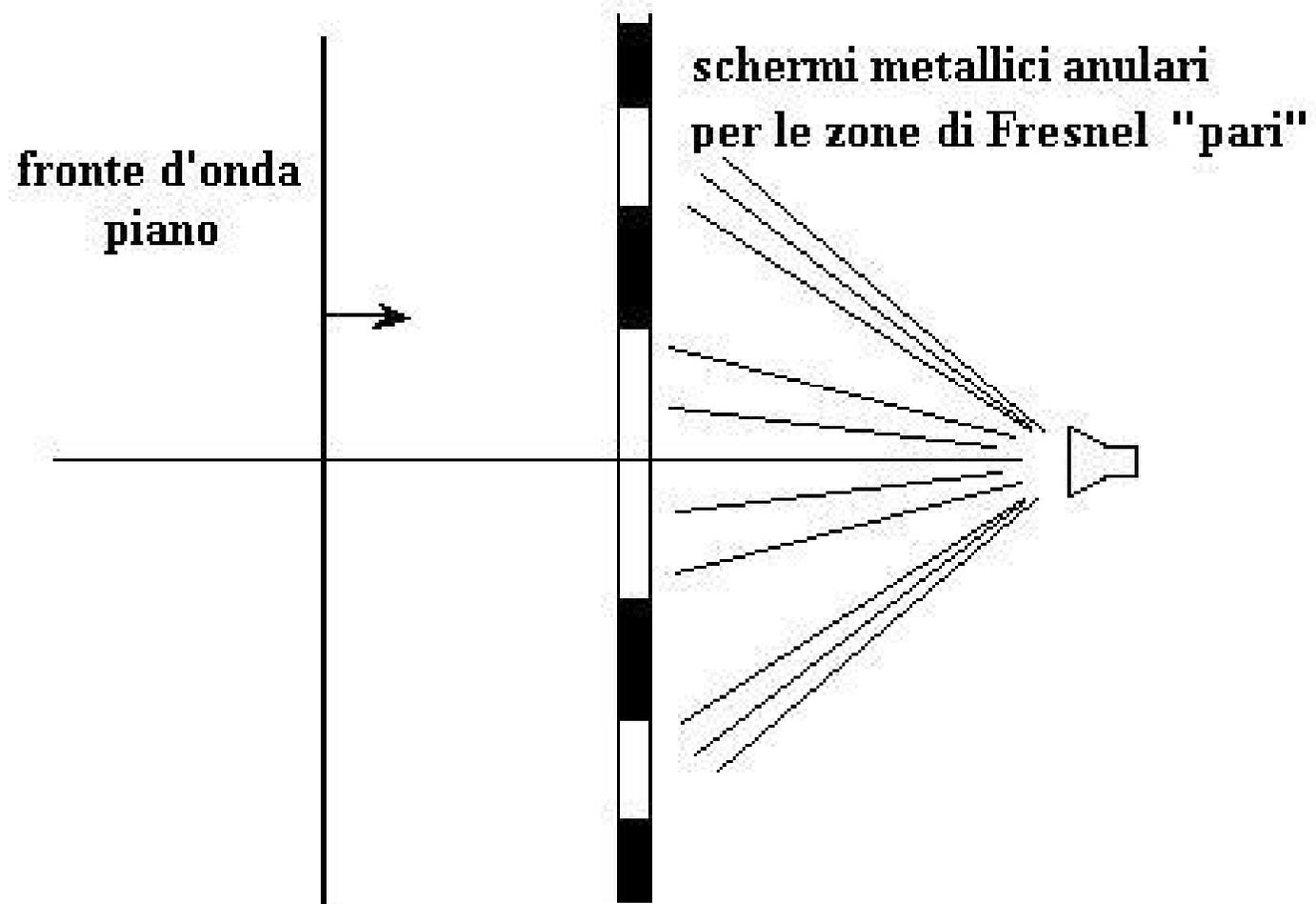


Per il calcolo, vedere, per esempio: <http://www.afar.net/fresnel-zone-calculator/>

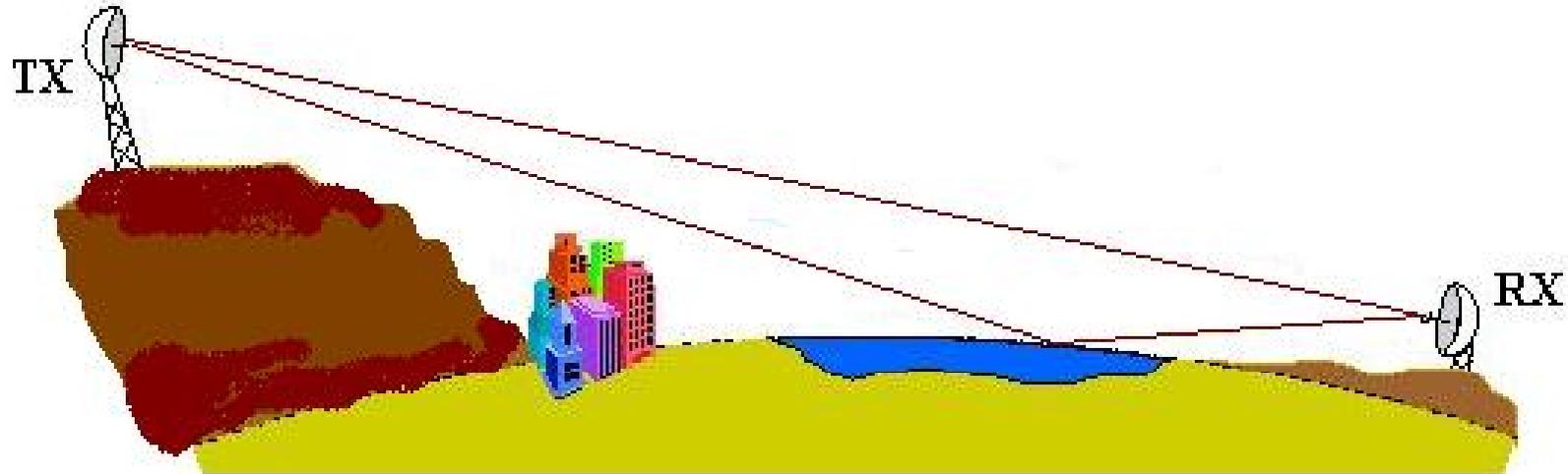
# DIFFRAZIONE DA SINGOLO OSTACOLO



# FRESNEL ZONE ANTENNA



# INTERFERENZA



Le due onde, diretta e riflessa, possono avere ampiezza abbastanza simile, ma fase differente. → **Interferenza costruttiva e distruttiva.** Sul mare, per la presenza delle maree, l'interferenza può cambiare nel tempo (il percorso "riflesso" cambia di lunghezza e, quindi di fase) e diviene riconoscibile il periodo "lungo" di circa 12 ore sull'ampiezza ricevuta.

## Proprietà elettromagnetiche dei suoli

	Costante dielettrica relativa $\epsilon_r$	Conducibilità $\sigma$ [mho/m]
Acqua di mare	80	4
Acqua dolce	80	$10^{-2} \div 10^{-3}$
Terreno paludoso	30	$10^{-2}$
Terreno coltivato bagnato	24	0.6
Terreno coltivato secco	2	0.03
Terreno desertico	3	$7 \cdot 10^{-3}$

## FADING DA INTERFERENZA ecc...

Se il segnale giunge all'antenna ricevente , oltre che per via diretta, anche per altre vie , si creano differenze di fase tra le tensioni indotte sull'antenna ricevente dalle varie onde che arrivano da percorsi di diversa lunghezza.

A seconda dell'ampiezza e fase di queste tensioni ha luogo un più o meno evidente affievolimento o fading da interferenza.

La propagazione attraverso più vie può essere dovuta a riflessioni su superfici verticali (edifici) o su superfici lisce orizzontali (specchi d'acqua) oltre che a molteplici percorsi per via troposferica.

Per ridurre il fading da interferenza, molto utile è la ricezione in diversità (diversity)

## RICEZIONE IN DIVERSITA' (DIVERSITY)

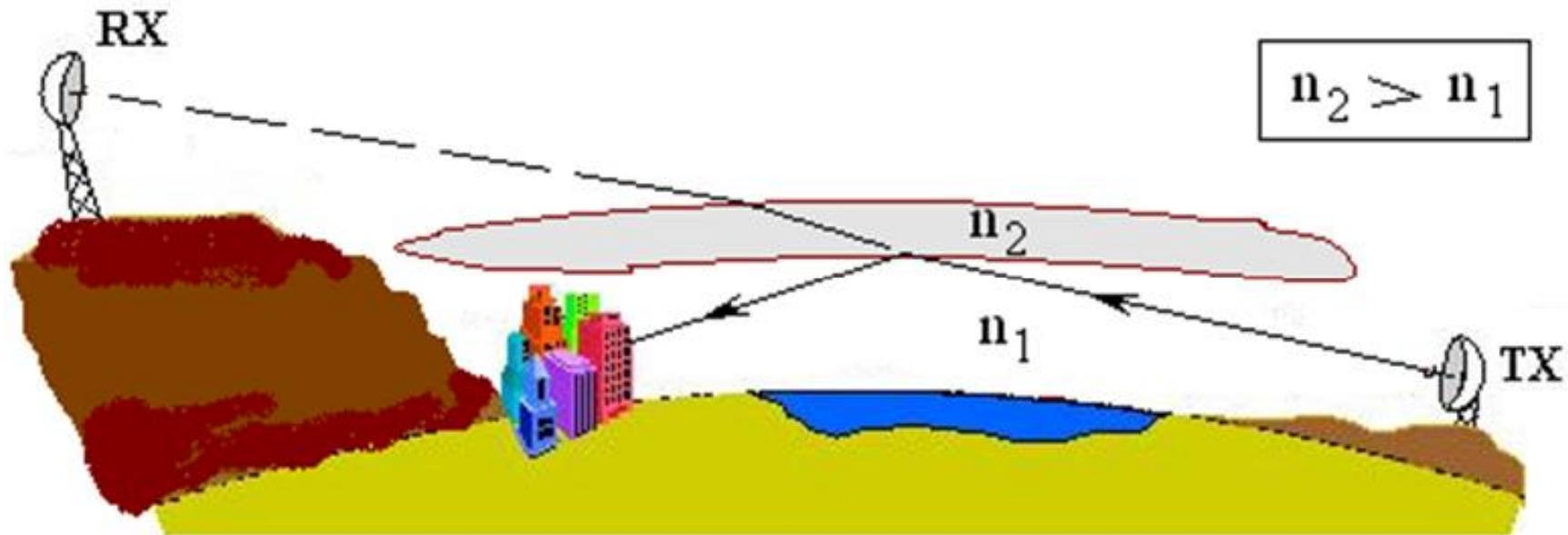
### **Diversità spaziale –**

il segnale viene ricevuto attraverso due (o più) antenne separate nello spazio (almeno decine di lunghezze d'onda) con due ricevitori.

**Diversità di frequenza -** Occorre trasmettere l'informazione contemporaneamente su due frequenze. E', quindi, molto meno probabile che il fading si presenti contemporaneamente sulle due frequenze.

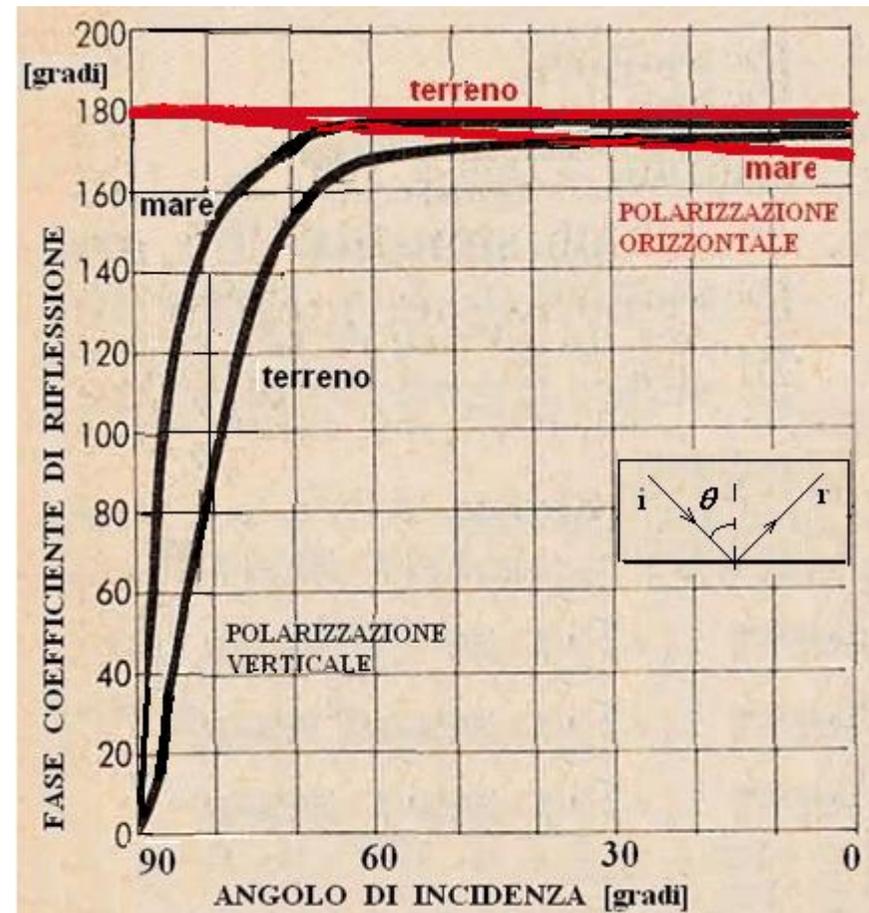
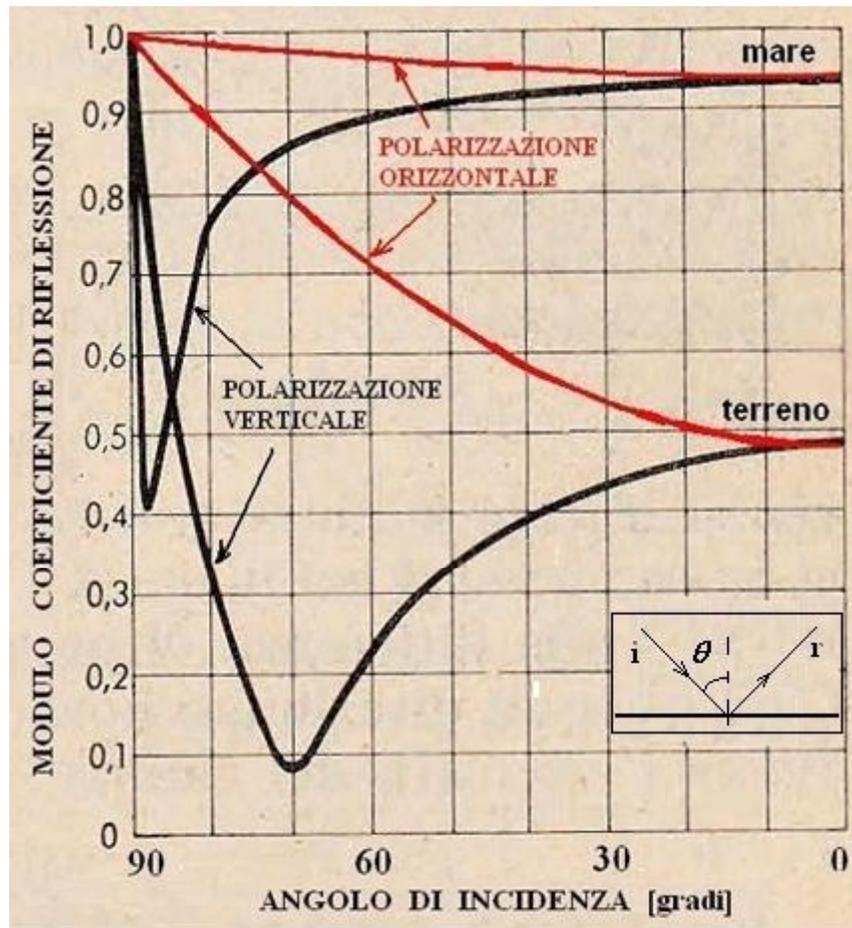
Il sistema di diversità spaziale è da preferire dato che si occupa un solo canale di frequenze.

## RIFLESSIONE DA STRATO RIFLETTENTE

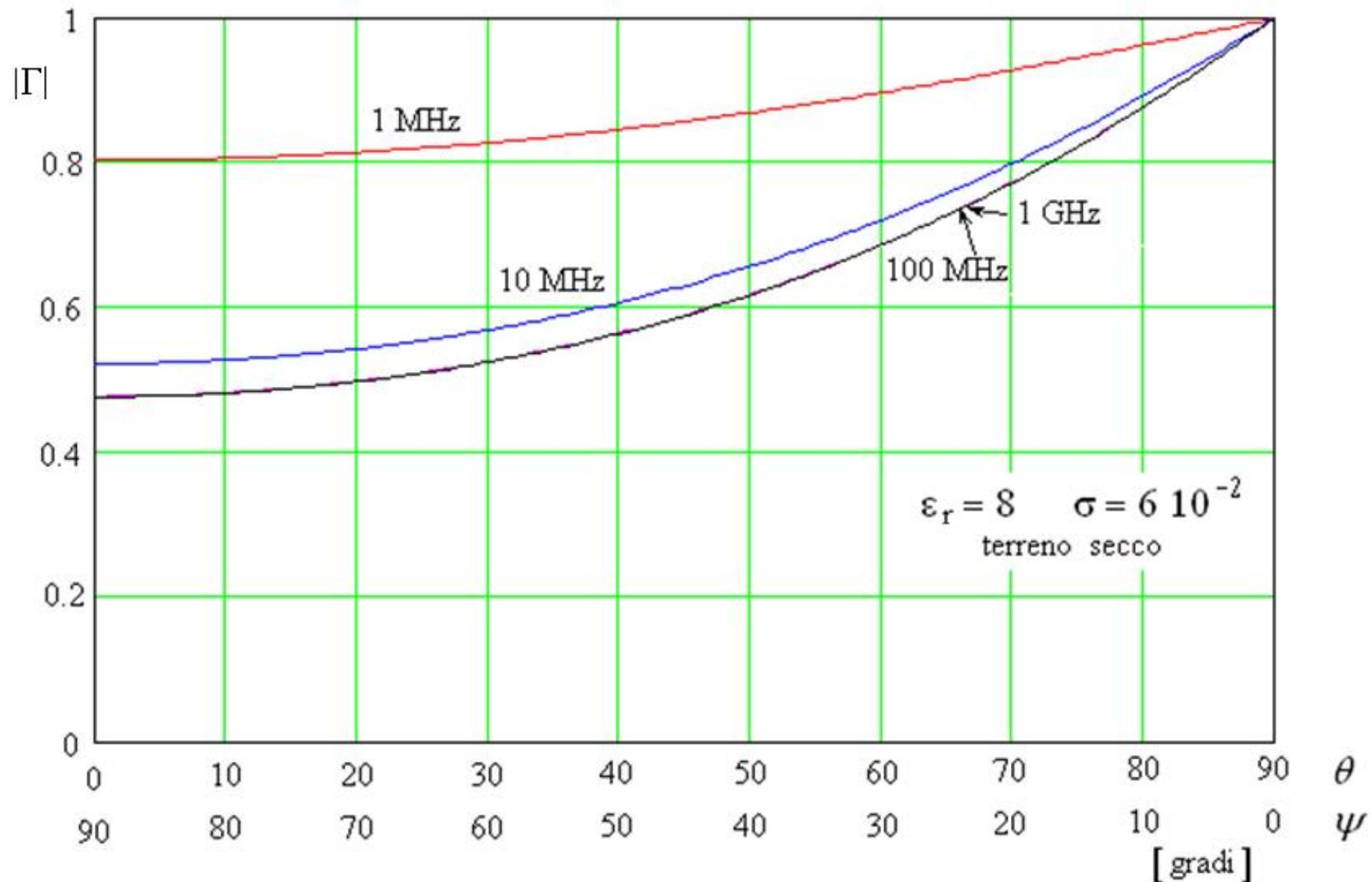


La presenza di uno strato riflettente con  $n_2 > n_1$  può creare sensibile attenuazione al ricevitore.

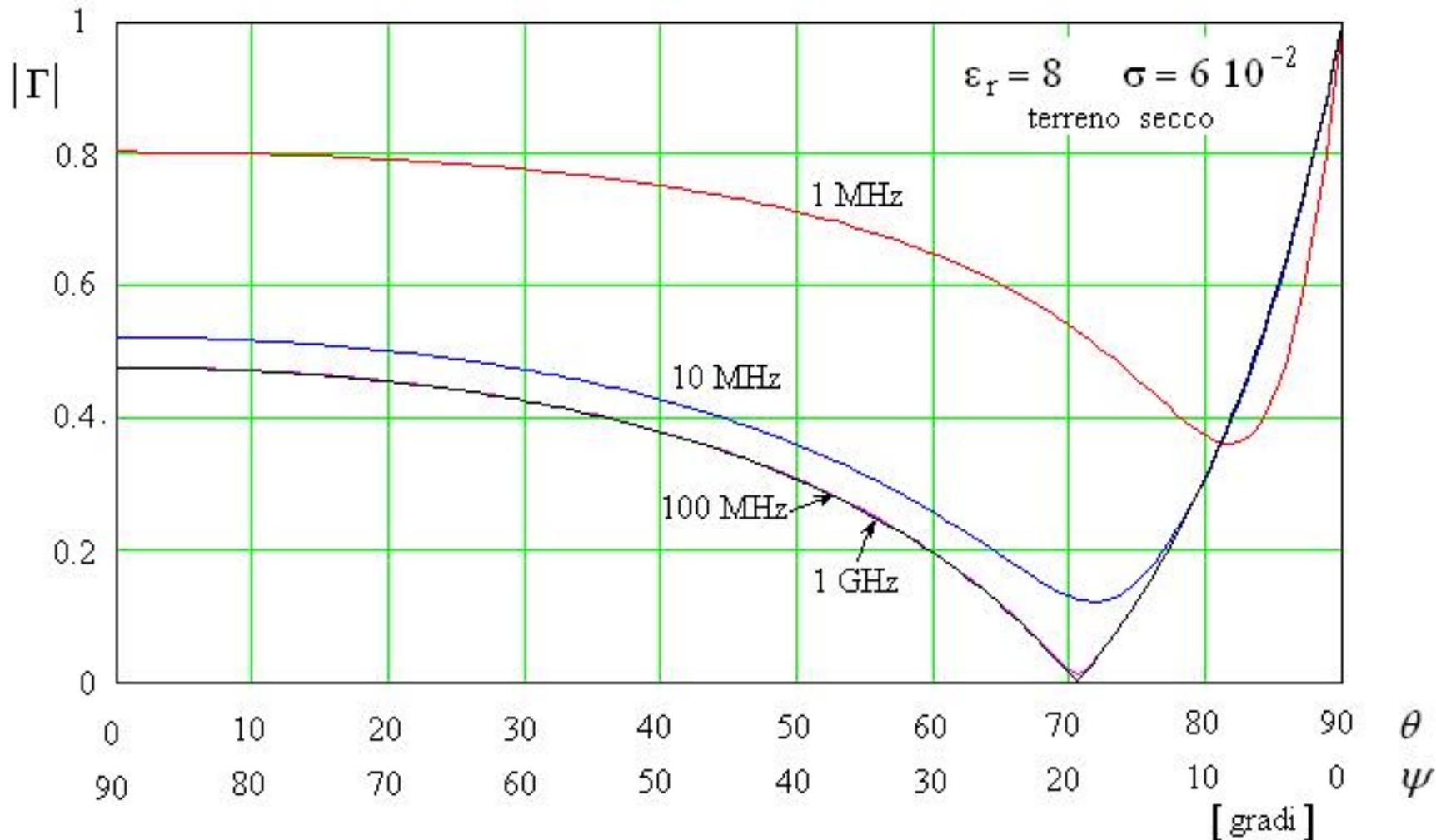
## Coefficiente di riflessione



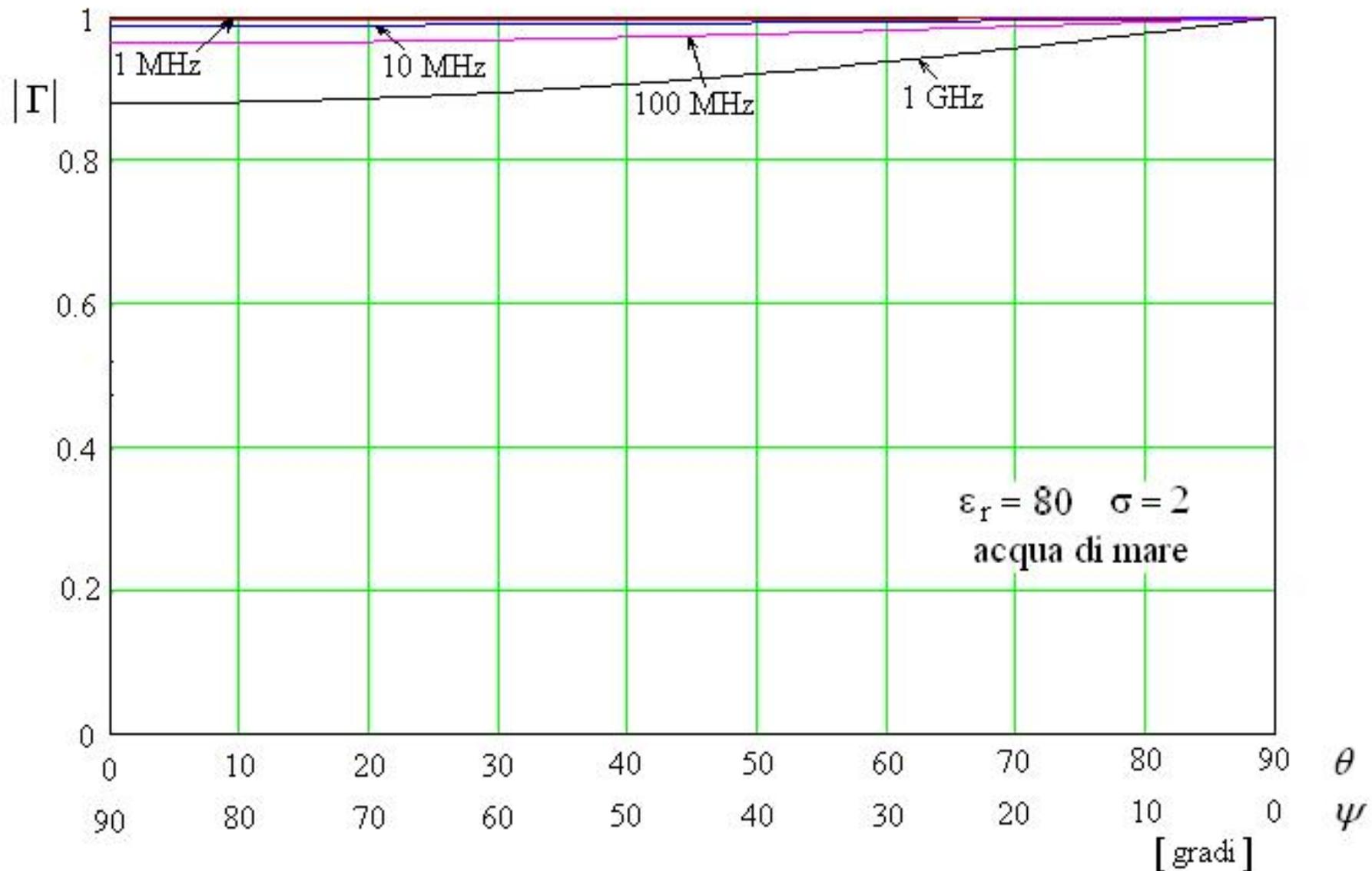
Il coefficiente di riflessione (modulo e fase) dipende dalle caratteristiche fisiche del punto di riflessione (costante dielettrica, conducibilità), dalla polarizzazione dell'onda e dalla frequenza. E' riportato un esempio.



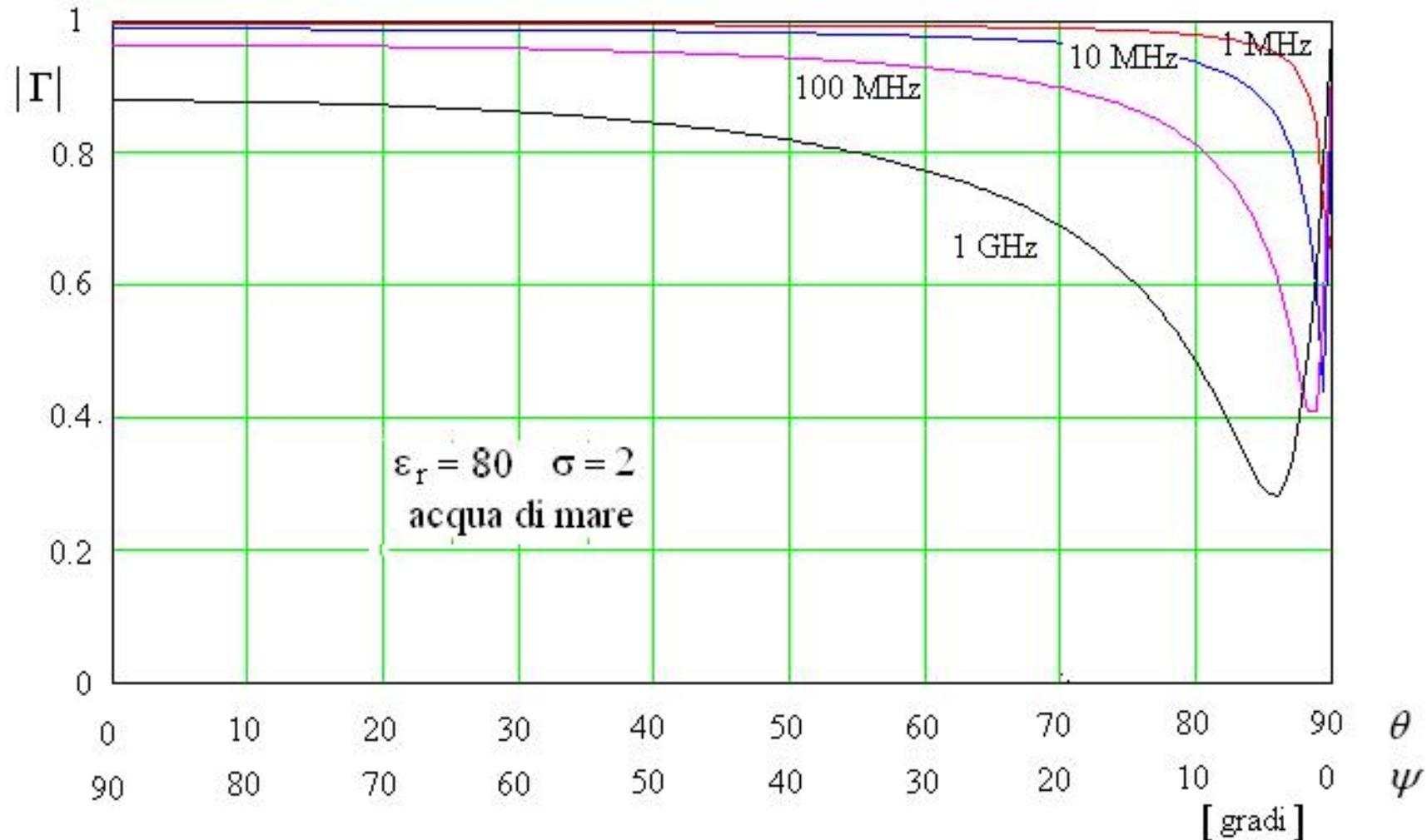
**POLARIZZAZIONE ORIZZONTALE** (Polarizzazione perpendicolare al piano di incidenza). Modulo del coefficiente di riflessione in funzione dell'angolo di incidenza  $q$  (e dell'angolo di radenza  $\psi = 90 - q$ ) per alcune frequenze di lavoro, per terreno secco e non rugoso (riferito alla lunghezza d'onda).



**POLARIZZAZIONE VERTICALE (Polarizzazione parallela al piano di incidenza).**  
 Modulo del coefficiente di riflessione in funzione dell'angolo di incidenza  $q$   
 (e dell'angolo di radenza  $\psi = 90 - q$ ) per alcune frequenze di lavoro, per terreno  
 secco e non rugoso (riferito alla lunghezza d'onda).



**POLARIZZAZIONE ORIZZONTALE** (Polarizzazione perpendicolare al piano di incidenza). Modulo del coefficiente di riflessione in funzione dell'angolo di incidenza  $q$  (e dell'angolo di radenza  $\psi = 90 - q$ ) per alcune frequenze di lavoro, per riflessione su superficie marina non increspata (riferito alla lunghezza d'onda).



**POLARIZZAZIONE VERTICALE (Polarizzazione parallela al piano di incidenza).**

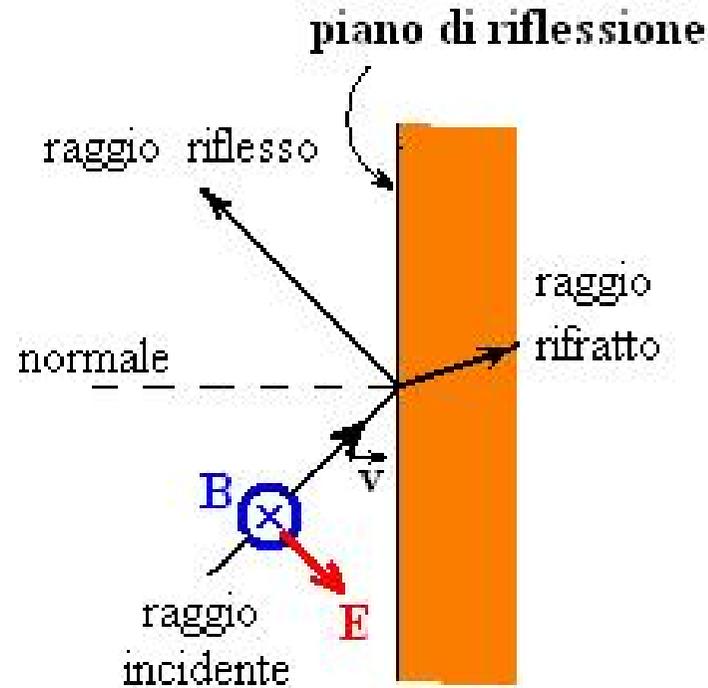
Modulo del coefficiente di riflessione in funzione dell'angolo di incidenza  $q$  (e dell'angolo di radenza  $y = 90 - q$ ) per alcune frequenze di lavoro, per riflessione su superficie marina non increspata (riferito alla lunghezza d'onda).

Eccetto il caso di riflessione su piano perfettamente conduttore, con polarizzazione verticale esiste un angolo di incidenza (angolo di Brewster) per il quale il coefficiente di riflessione è quasi nullo (raggio riflesso quasi assente). Praticamente tutta la potenza è trasmessa nel mezzo dielettrico (raggio rifratto).

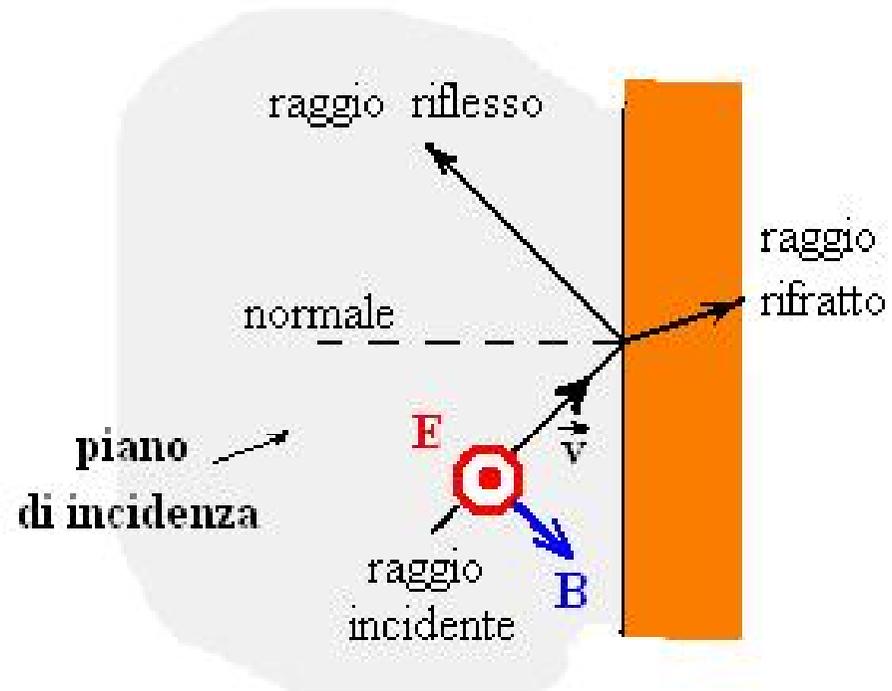
Questa condizione non si verifica con polarizzazione orizzontale.

La generica onda che incide la superficie con angolo di Brewster è riflessa se ha componente polarizzata orizzontalmente (la componente verticale non viene riflessa). La riflessione con angolo di Brewster viene, infatti, usata in ottica come sistema polarizzatore.

## RIFLESSIONE SU MATERIALE POCO CONDUTTORE



campo elettrico  $E$  nel  
piano di incidenza  
(parallel polarization)  
[polarizzazione verticale]



campo elettrico  $E$  normale  
al piano di incidenza  
(perpendicular polarization)  
[polarizzazione orizzontale]

# TROPOSPHERIC SCATTERING

- La propagazione di onde in gamma VHF-UHF, che normalmente si limita alla portata ottica, viene debolmente influenzata da piccole variazioni di densità dell'atmosfera ad altezza di una decina di chilometri; le onde sono diffuse da queste irregolarità e possono ritornare verso Terra permettendo collegamenti oltre l'orizzonte sino a 600 ÷ 1000 km. Utilizzando potenze elevate ed antenne di buon guadagno il collegamento può diventare stabile e sicuro

# METEOR SCATTERING

Le intense colonne ionizzate generate dall'impatto di meteore sulla atmosfera terrestre possono permettere la riflessione di onde radio in gamma VHF-UHF. Data l'elevata altitudine di queste tracce il segnale riflesso può raggiungere distanze anche di 1500 km usando potenze non particolarmente elevate. La durata di queste colonne ionizzate, però, è di breve durata (0.1 ÷ 1 s).

Occorre usare modi digitali di trasmissione ad alto contenuto di informazione e trasmettere ripetutamente i dati sino ad inbattersi in un evento meteorico che permetta il collegamento.

# RAIN SCATTERING

Le gocce d'acqua di un tipico temporale estivo possono causare diffusione di onde elettromagnetiche a frequenze molto elevate (microonde:  $3 \div 30$  GHz). Occorre che la lunghezza d'onda della radiazione sia confrontabile con le dimensioni delle gocce d'acqua, senza salire, però, troppo in frequenza per non aumentare l'attenuazione (che è proporzionale alla frequenza); questo fenomeno è meglio osservato a frequenze attorno a 10 GHz e permette saltuari collegamenti a microonde su distanze di  $500 \div 800$  km.

La polarizzazione dell'onda influenza il tipo di diffusione; con onde polarizzate orizzontalmente la diffusione avviene principalmente in avanti (e indietro), mentre se la polarizzazione è verticale la diffusione avviene lateralmente

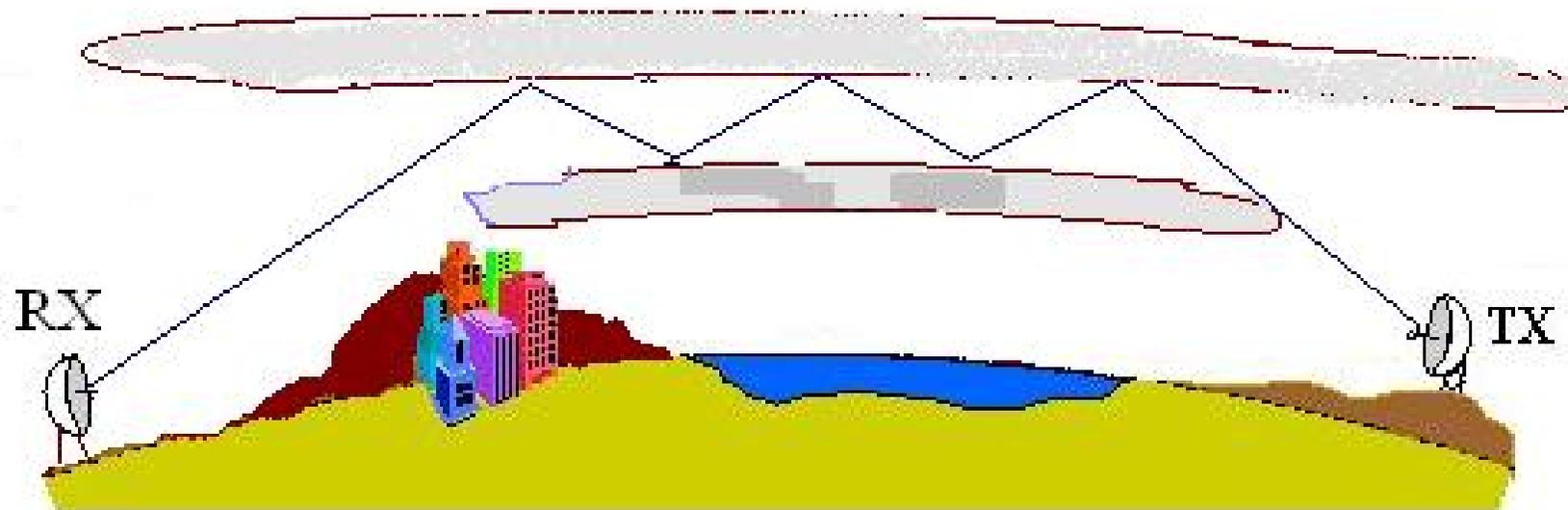
.

# TROPO DUCTING

Se l'indice di rifrazione della troposfera non è monotono con la quota per la presenza, per esempio, di uno strato di aria calda sovrastante uno strato di aria fredda, si può formare un "condotto": l'onda elettromagnetica è intrappolata tra i due strati e può propagarsi a lunga distanza con minima attenuazione (a volte anche inferiore a quanto previsto per propagazione nello spazio libero).

Ciò si presenta specialmente con microonde (1 ÷ 10 GHz), sia di giorno sia di notte, con atmosfera calma e stratificata (per esempio, d'estate sulla superficie marina) e, mentre può portare alla ricezione di segnali a lunga distanza (anche 1000 km), può produrre una interruzione dei collegamenti (black-out) con stazioni vicine. Il condotto può presentarsi e svanire in decine di minuti oppure durare per diversi giorni; in genere è selettivo (può manifestarsi in una sola banda di frequenze). In base alla quota di formazione si distinguono in condotti di superficie e condotti elevati.

# TROPO DUCTING



Un condotto elevato consente la propagazione ben oltre l'orizzonte. L'altezza del condotto condiziona la frequenza minima che riesce a rimanere intrappolata tra strati di differente indice  $n$ . Il fenomeno è frequente sul mare.

Per frequenze superiori a 10 GHz circa, l'atmosfera non può essere ritenuta un mezzo non dissipativo; occorre tenere presente vari contributi all'attenuazione totale:

- ) attenuazione dovuta alla concentrazione del vapore d'acqua, il cui massimo cade attorno a 24 GHz
- ) contributo all'assorbimento da parte dell'ossigeno molecolare; il suo effetto comincia a manifestarsi a frequenze superiori ai 30 GHz, con un massimo attorno ai 60 GHz.
- ) attenuazione dovuta alla presenza di pioggia lungo il collegamento

# Attenuazione atmosferica

Alcuni gas componenti l'atmosfera (es: O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) provocano attenuazione perché le loro molecole presentano un momento di dipolo elettrico o magnetico ed interagiscono con il campo elettromagnetico.

L'attenuazione da gas atmosferici varia al variare della concentrazione dei gas e, in prima approssimazione, dipende linearmente dal valore della concentrazione stessa.

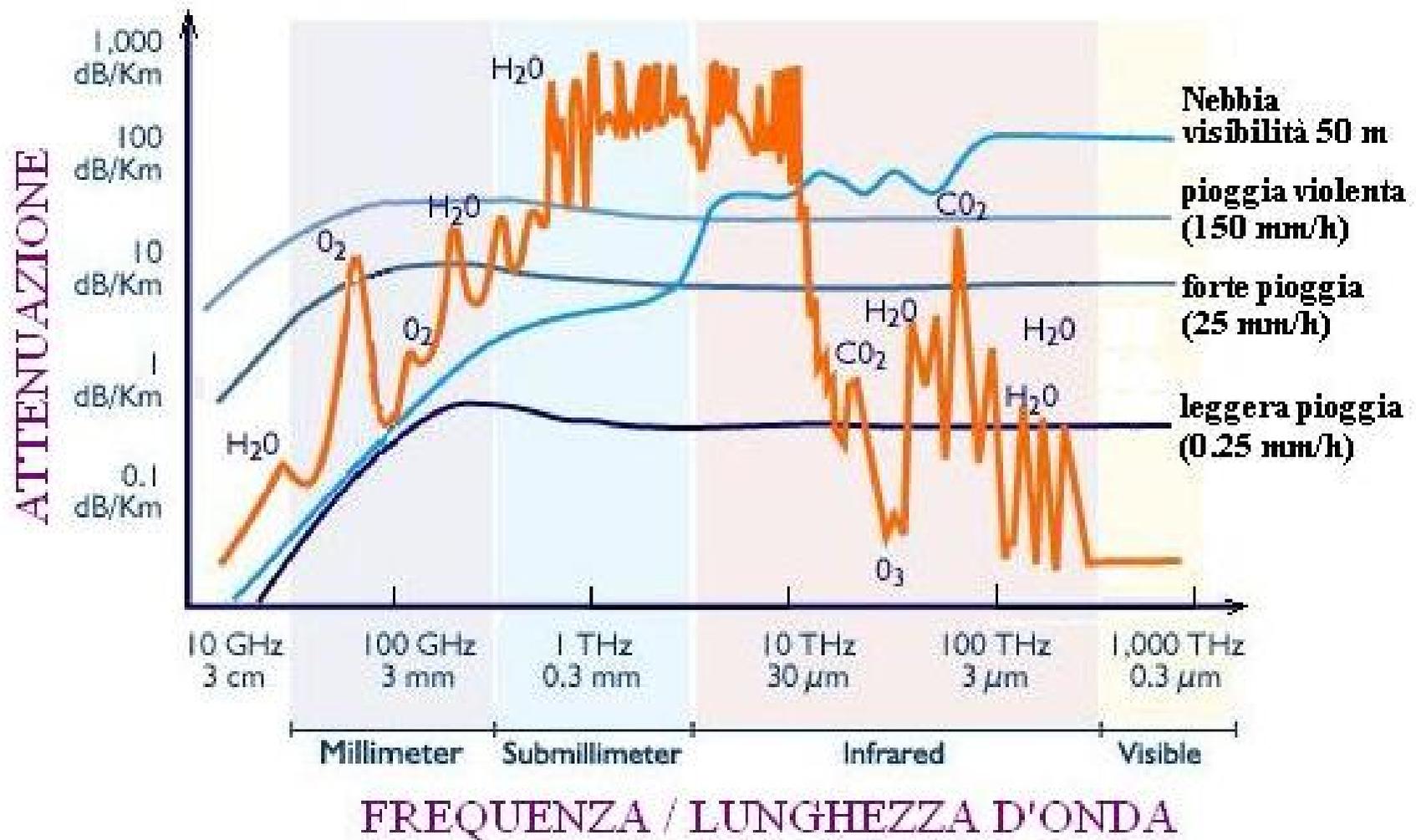
Per il vapor d'acqua si ha la seguente formula empirica ( $r$  è la concentrazione in g/

$$A_{\text{H}_2\text{O}} = \left\{ 0.050 + 0.0021 \rho + \frac{3.6}{(f - 22.2)^2 + 8.5} + \frac{10.6}{(f - 183.3)^2 + 9.0} + \frac{8.9}{(f - 325.4)^2 + 26.3} \right\} f^2 \rho 10^{-4} \quad [\text{dB/km}]$$

## Composizione media della troposfera, al suolo

Azoto ( $N_2$ )	78.1 %	volume
Ossigeno ( $O_2$ )	20.9 %	
Argon (Ar)	0.9 %	
Biossido di carbonio ( $CO_2$ )	330 ppm	
Neon (Ne)	18 ppm	
.....		

A tali gas si aggiunge il vapore acqueo ( $H_2O$ ) la cui percentuale è molto variabile (0.001 % ÷ 4 %)



Sopra i 100 ÷ 150 GHz l'attenuazione atmosferica consente il servizio solo per brevissime tratte.

Queste frequenze sono in previsione di essere utilizzate per scambio di dati tra computer nell'ambito dello stesso ufficio. Non c'è interferenza con locali adiacenti (l'attenuazione è elevata). L'uso di frequenze elevate consente lo scambio a velocità dell'ordine di parecchi GB/s.

Interessante la finestra a circa 10000 nm (10 micron), nell'infrarosso. Non c'è ancora la tecnologia per queste frequenze, ma ci sono già i laser CO<sub>2</sub>, proprio a queste frequenze. Dovrebbero essere possibili collegamenti in aria secca anche ad un centinaio di km.

# BEACON MICROONDE

E' noto l'ausilio dei beacon in HF. In banda 10 m sono molti i beacon presenti che segnalano la possibilità di collegamenti con le varie zone.

Molto apprezzati sono i beacon a microonde, ma per altri motivi:

-È possibile tarare il goniometro dell'antenna (molto direttiva e con ampiezza del fascio molto ridotta) direzionandola sul beacon ascoltato facilmente la cui direzione è nota.

-In alcuni casi, come per i nostri beacon a 1.2 e 5.7 GHz , è possibile tarare la frequenza di lavoro del RTX. Essendo questi legati al GPS, forniscono una frequenza precisa sulla quale tarare il transceiver .





**Beacon**

**5760.800 MHz**

**dell' ARI-Parma**

**Monte Cassio**

**JN54AO**

**h = 1010 m**

## Beacon 5.7 GHz dell'ARI-Parma

- **RINGRAZIAMENTI**

La costruzione del beacon 5.7 GHz ha coinvolto molti soci della Sezione di Parma a cui va il nostro ringraziamento ed è opera di un gruppo che, con la collaborazione, è riuscito a completare un progetto che, come singoli, nessuno di noi sarebbe stato capace di portare a termine da solo.

E' un piacere ed è doveroso ringraziare alcuni soci che hanno dato un contributo particolarmente importante all'iniziativa di Sezione:  
Enrico I4MLL, Franco IK4UQK , Lucio IW2FND, Nicola I4YMB.

Carlo I4VIL & Gruppo Microonde