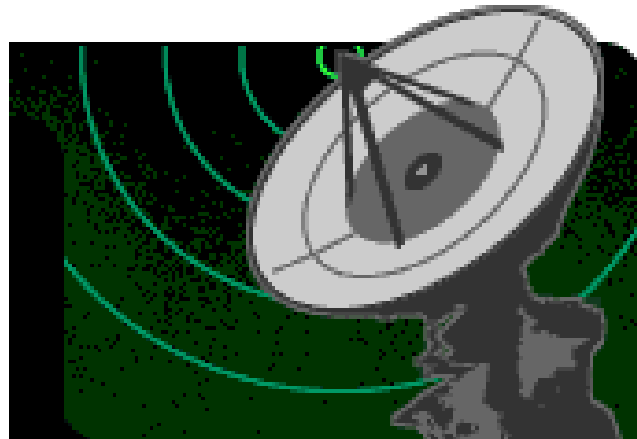
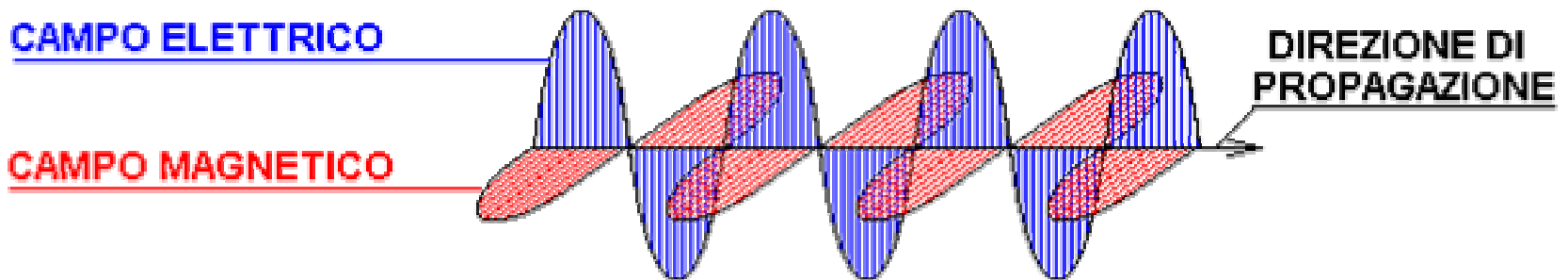


# Propagazione libera



# Onde elettromagnetiche

Sono oscillazioni del campo elettrico e del campo magnetico che si propagano nel vuoto alla velocità di circa  $3 \times 10^8$  m/s (velocità della luce)



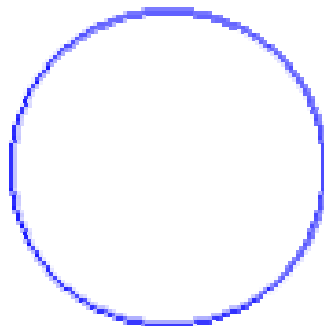
- Longitudinali: l'oscillazione avviene nella stessa direzione della propagazione
- Trasversali: l'oscillazione avviene perpendicolarmente alla direzione della propagazione

# Polarizzazione delle onde elettromagnetiche

- Le onde elettromagnetiche possono avere polarizzazione **lineare**, **circolare ed ellittica** a seconda del modo in cui si propagano nello spazio: nel primo caso il vettore campo elettrico si muove su di una retta, nel secondo su di un cerchio e nel terzo su di un'ellisse:



**LINEARE**



**CIRCOLARE**



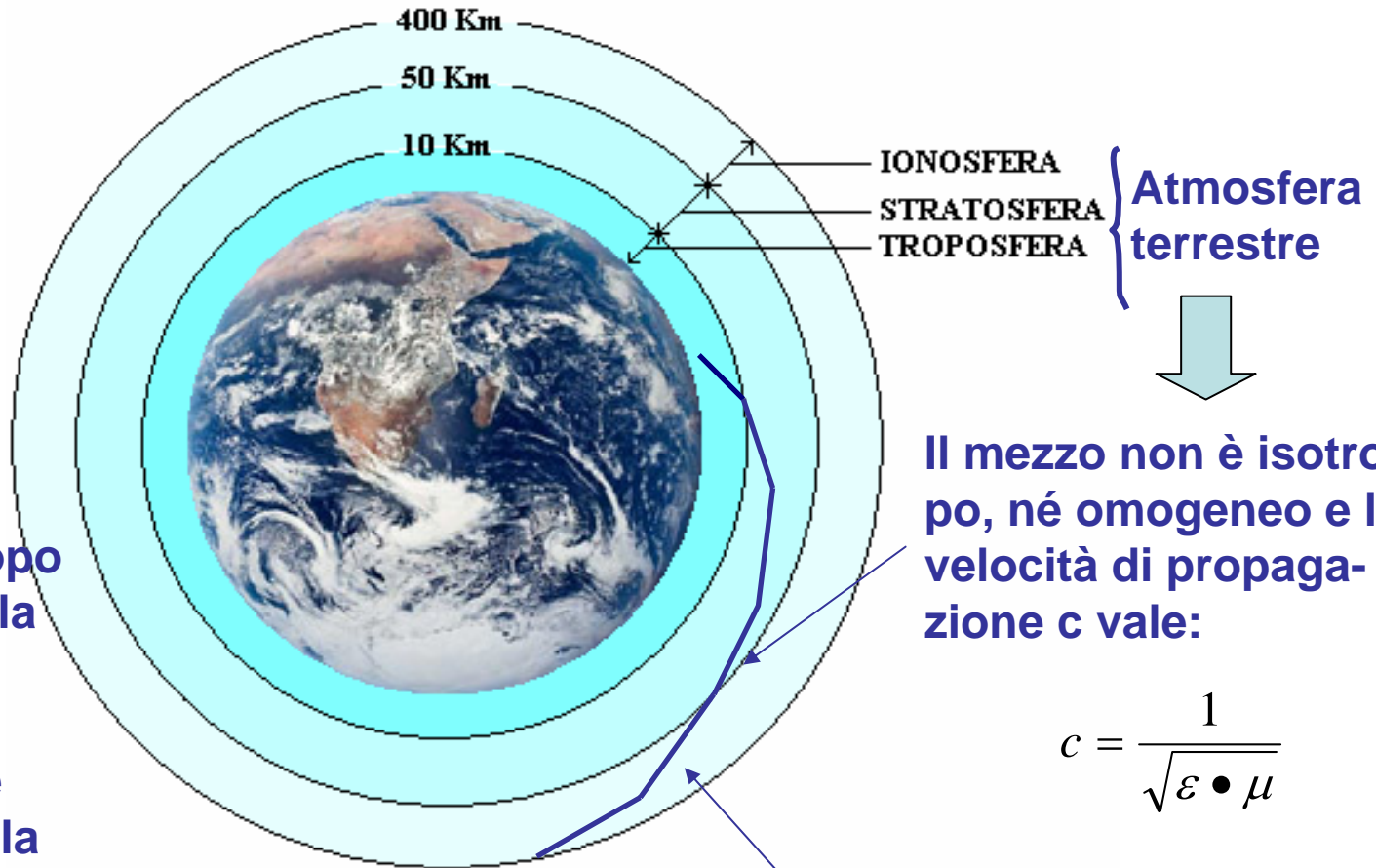
**ELLITTICA**

# Propagazione delle onde elettromagnetiche

Spazio, lontano dall'atmosfera terrestre

Le onde si muovono in linea retta

Il mezzo è isotropo ed omogeneo e la velocità di propagazione  $c = 3 \times 10^8$  m/s e non dipende dalla frequenza



Il mezzo non è isotropo, né omogeneo e la velocità di propagazione  $c$  vale:

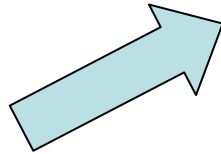
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$$

Nell'atmosfera  $c$  dipende dalla frequenza  $c = \lambda \cdot f$  4

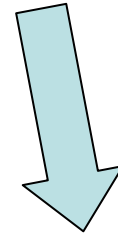
# Propagazione nell'atmosfera terrestre

- I fenomeni cui è soggetta sono:

- ATTENUAZIONE
- RIFLESSIONE
- RIFRAZIONE
- DIFFRAZIONE
- DIFFUSIONE
- FADING



In seguito a tali fenomeni il comportamento delle onde elm si diversifica molto con il variare della frequenza per cui si possono avere tipi diversi di propagazione:



- ✓ ONDA DI SUPERFICIE
- ✓ ONDA DIRETTA
- ✓ ONDA RIFLESSA DAL SUOLO
- ✓ SCATTERING TROPOSFERICO
- ✓ ONDE SPAZIALI

# Equazioni di MAXWELL

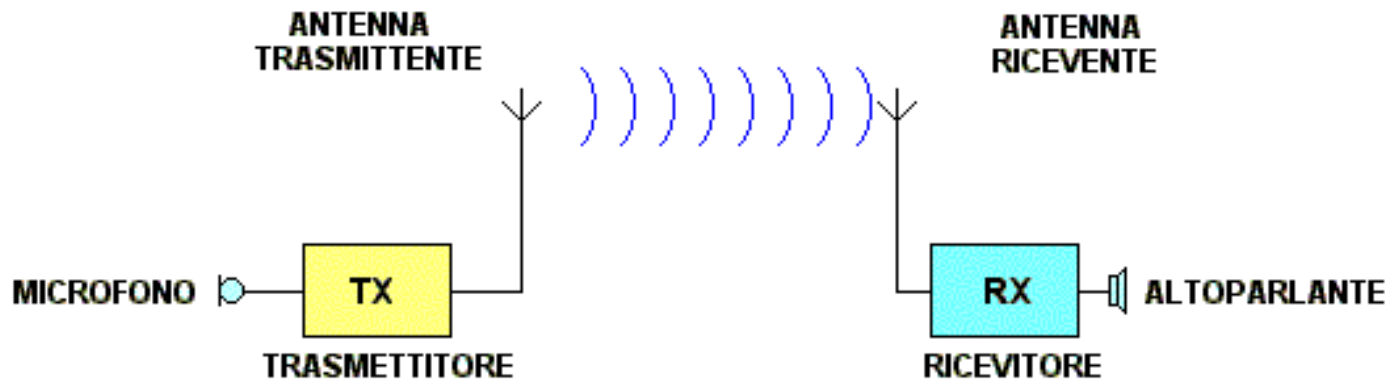
N°	EQUAZIONI IN FORMA INTEGRALE	EQUAZIONI IN FORMA DIFFERENZIALE	LEGGE FISICA CORRISPONDENTE
I°	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon}$	$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$	LEGGE DI GAUSS PER IL CAMPO ELETTRICO
II°	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	$\text{div} \vec{B} = 0$	LEGGE DI GAUSS PER IL CAMPO MAGNETICO
III°	$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$	$\text{rot} \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt}$	LEGGE DI INDUZIONE DI FARADAY
IV°	$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \left( I + \epsilon \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$	$\text{rot} \vec{B} = \mu \left( \vec{J} + \epsilon \frac{d\vec{E}}{dt} \right)$	LEGGE DELLA CIRCUITAZIONE DI AMPERE

# CLASSIFICAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE

FREQUENZA (Hertz)	LUNGHEZZA D'ONDA (metri)	TIPO
$3 \cdot 10^3 \div 3 \cdot 10^8$	$10^5 \div 10^0$	Onde radio
$3 \cdot 10^8 \div 3 \cdot 10^{11}$	$10^0 \div 10^{-3}$	Microonde
$3 \cdot 10^{11} \div 4 \cdot 10^{14}$	$10^{-3} \div 0,7 \cdot 10^{-6}$	Raggi infrarossi
$4 \cdot 10^{14} \div 7 \cdot 10^{14}$	$0,7 \cdot 10^{-6} \div 0,4 \cdot 10^{-6}$	Luce visibile
$7 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{17}$	$0,4 \cdot 10^{-6} \div 10^{-9}$	Raggi ultravioletti
$3 \cdot 10^{17} \div 3 \cdot 10^{19}$	$10^{-9} \div 10^{-11}$	Raggi X
$3 \cdot 10^{19} \div 3 \cdot 10^{22}$	$10^{-11} \div 10^{-16}$	Raggi gamma
$> 3 \cdot 10^{22}$	$< 10^{-15}$	Raggi cosmici

# Propagazione libera

- Una trasmissione radio via etere utilizza due stazioni emittente/ricevente di onde elettromagnetiche che si propagano liberamente nello spazio circostante. Le stazioni sono costituite da un apparato trasmittente con un'antenna terminale da un lato e dall'altro lato da un'antenna e da un apparato ricevente come in figura:



# Flusso di energia e ...

- Quando un'antenna isotropa genera un'onda elettromagnetica che si propaga nello spazio, ad essa è sempre associata una densità di potenza elettromagnetica, rappresentata dal **vettore di Poynting**, la cui direzione è quella della propagazione, ed il cui valore è determinato dal prodotto vettoriale del campo elettrico per il campo magnetico secondo la relazione seguente:

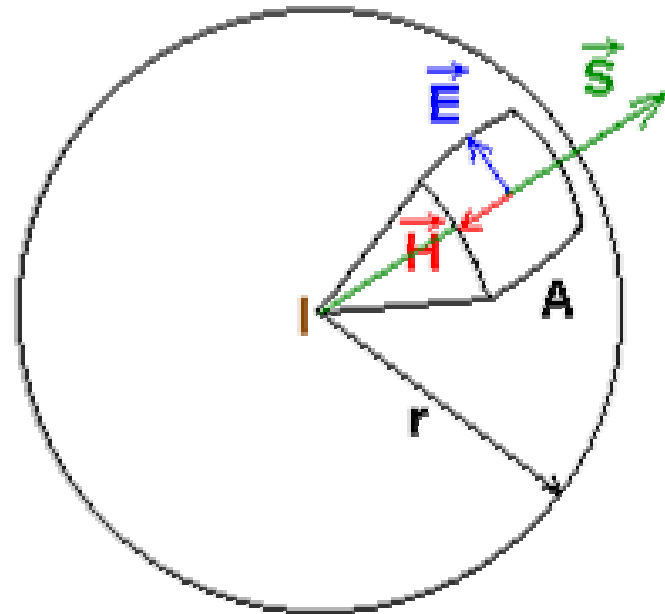
$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} = \vec{E} \bullet \vec{H} \bullet \text{sen } \vartheta$$

- in cui  $\vec{S}$  è il **Vettore di Poynting**

# ... e Potenza trasmessa

La Potenza trasmessa vale  $P = \int_A \vec{S} \cdot \vec{n} dA = \int_A \vec{E} \times \vec{H} \cdot \vec{n} dA$

- $\vec{E}$  = CAMPO ELETTRICO
- $\vec{H}$  = CAMPO MAGNETICO
- $\vec{S}$  = VETTORE DI POYNTING
- A = AREA
- I = ANTENNA ISOTROPA
- r = RAGGIO



# Potenza trasmessa

- Essendo  $4 \pi r^2$  la superficie della sfera di raggio  $r$ , la potenza  $P_{tr}$  che attraversa un  $m^2$  di superficie sferica ortogonale alla direzione di propagazione è legata al vettore di Poynting dalla relazione:

$$S = \frac{P_{tr}}{4\pi r^2}$$

- Tutte le antenne reali hanno un guadagno  $G_{tr}$  per ogni direzione di propagazione di cui va tenuto conto nel calcolo dell'energia irradiata in quella direzione, per cui la potenza prodotta da un'antenna reale, che attraversa l'area  $A$  normale alla direzione di propagazione, risulta:

$$S = \frac{P_{tr} \cdot G_{tr}}{4\pi r^2}$$

# Equazione fondamentale della trasmissione

- La potenza raccolta da un'antenna di area equivalente

$$A_{eq} = \frac{G_{ric} \cdot \lambda^2}{4\pi}$$

- vale:

$$P_{ric} = S \cdot A_{eq} = \frac{P_{tr} \cdot G_{tr}}{4\pi r^2} \cdot \frac{G_{ric} \cdot \lambda^2}{4\pi} = \frac{P_{tr} \cdot G_{tr} \cdot G_{ric}}{\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2}$$

- dove  $A_{sl} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2$  è l'attenuazione dello spazio libero

# Equazione fondamentale della trasmissione in decibel

- La potenza  $P_{ric}$  che un'antenna di guadagno  $G_{tr}$  riesce a trasmettere alla distanza  $r$  ad un'altra antenna di guadagno  $G_{ric}$  si calcola con la equazione **fondamentale della trasmissione** calcolata in decibel:

$$P_{ric}(\text{dB}_m) = P_{tr}(\text{dB}_m) + G_{tr}(\text{dB}) + G_{ric}(\text{dB}) - A_{sl}(\text{dB})$$

$P_{ric}(\text{dB}_m) = 10 \log_{10} \frac{P_{ric}(\text{W})}{10^{-3}}$	$G_{ric}(\text{dB}) = 10 \log_{10} G_{ric}$	$A_{sl}(\text{dB}) = 20 \log_{10} \frac{4\pi r}{\lambda}$
$P_{tr}(\text{dB}_m) = 10 \log_{10} \frac{P_{tr}(\text{W})}{10^{-3}}$	$G_{tr}(\text{dB}) = 10 \log_{10} G_{tr}$	

# Attenuazione, Diffrazione

- Questa **ATTENUAZIONE** è dovuta all'**assorbimento** di una parte dell'energia dell'onda da parte del mezzo in cui essa transita, cioè l'aria che contiene sempre polvere, molecole d'acqua in sospensione nelle nuvole, atomi ionizzati, ozono.
- Gli atomi stessi dell'aria in taluni casi determinano di per sé un'attenuazione: basti pensare all'effetto schermante dell'ozono nell'alta atmosfera, che ci protegge dai raggi ultravioletti del sole.
- Questo tipo di **attenuazione** varia molto con la lunghezza d'onda.
- La **DIFFRAZIONE** è un fenomeno fisico in base al quale **l'onda può propagarsi al di là di un ostacolo** di dimensioni paragonabili con la propria lunghezza d'onda.
- In altri termini un'onda ignora un ostacolo molto più piccolo della propria lunghezza d'onda, scavalca un ostacolo della stessa dimensione dell'onda, viene bloccata da un ostacolo molto più grande.
- Questo comportamento diversificato al variare della lunghezza d'onda è dovuto al postulato di **Fresnel** in base al quale ogni fronte d'onda si può considerare come una sorgente puntiforme d'onda stessa.

# Diffusione e SCATTERING Troposferico

- La **DIFFUSIONE** è un fenomeno fisico in base al quale le disomogeneità dell'aria, dovute a diversità di pressione, di temperatura, di umidità, e le turbolenze meteorologiche, determinano variazioni dell'indice di rifrazione e quindi la ritrasmissione del segnale **in una direzione diversa da quella di provenienza**, come indicato in figura, che descrive i ponti radio a **diffusione troposferica**.

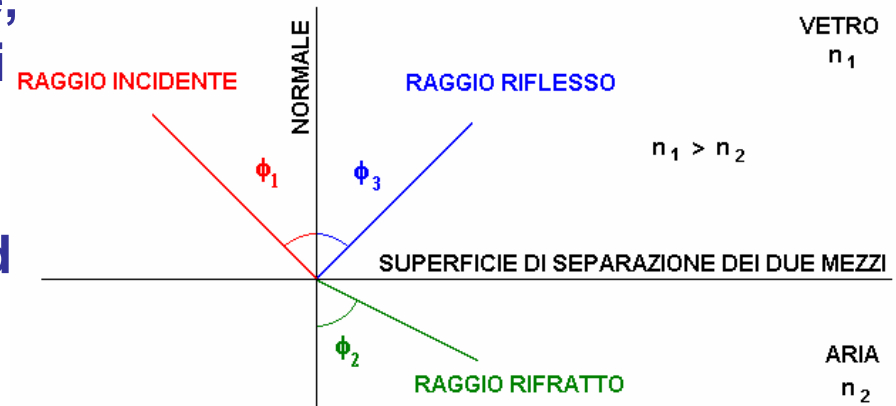


# Fading

- Il **FADING** è un fenomeno in base al quale un segnale di tipo elettromagnetico, viaggiando via etere lungo percorsi continuamente variabili, giunge al ricevitore **con intensità e fase discontinua**.
- Questo fatto può essere determinato, per esempio, nel caso delle trasmissioni tra cellulari, dal fatto che il trasmettitore/ricevitore si sposta continuamente costringendo le onde elettromagnetiche ad effettuare percorsi continuamente variabili con attenuazioni quindi diverse.
- Lo stesso può essere determinato dal continuo e lento variare delle condizioni di temperatura, umidità, pressione, pulviscolo dell'atmosfera, entro la quale avviene la propagazione, fatto questo che determina attraverso fenomeni di riflessione, rifrazione, diffusione, delle onde, la ricezione di un segnale con ampiezza e fase continuamente variabile.

# Riflessione

- La riflessione delle onde elettromagnetiche si studia come quella della luce secondo le leggi di SNELL e si manifesta in presenza di un ostacolo lungo il percorso dell'onda
- Un raggio luminoso, che si propaga in un mezzo trasparente, ad esempio il vetro, con indice di rifrazione  $n_1$  ed incontra un altro mezzo pure trasparente, con indice di rifrazione  $n_2$  diverso, ad esempio minore, come l'aria, viene in parte riflesso ed in parte rifratto come indicato in figura.



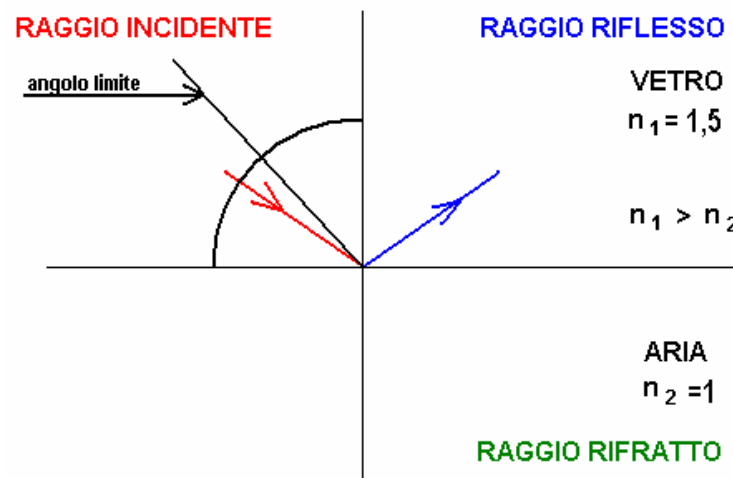
La prima legge di Snell riguarda la riflessione e dice che il raggio incidente ed il raggio riflesso formano lo stesso angolo con la normale e sono tutti e tre complanari:  $\phi_1 = \phi_3$

# Rifrazione

- La seconda legge di Snell, invece, riguarda il fenomeno della rifrazione, e lega l'angolo di incidenza e l'angolo di riflessione, con gli indici di rifrazione, secondo la formula:

$$\frac{\text{sen}\Phi_1}{\text{sen}\Phi_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

- Poiché  $n_1 > n_2$ , di conseguenza,  $\Phi_2 > \Phi_1$ , ma  $\text{sen}\Phi_2$ , può assumere al massimo il valore di 1, cui corrisponde un angolo di rifrazione di  $90^\circ$ , cioè praticamente l'assenza di rifrazione.



# ONDA DI SUPERFICIE

- L'**onda di superficie** segue la superficie terrestre, scavalcando le colline, superando laghi e fiumi ed anche mari.
- È molto condizionata, nella sua attenuazione, dalla conducibilità del terreno.
- La propagazione per onde di superficie è limitata alle **basse ed alle bassissime frequenze**, nelle gamme **LF** e **VLF** in quanto l'attenuazione cresce con la frequenza.
- L'onda, per propagarsi, è bene che sia **polarizzata verticalmente**, perché una componente orizzontale del campo elettrico determinerebbe correnti indotte sulla superficie che ha pur sempre una sua conducibilità, determinando assorbimento di energia e quindi attenuazione.
- Poiché la superficie del mare le attenua poco, vengono usate di preferenza per le **comunicazioni nautiche ed anche con sommergibili**.
- Si riesce così a coprire distanze di circa 1.000 chilometri.

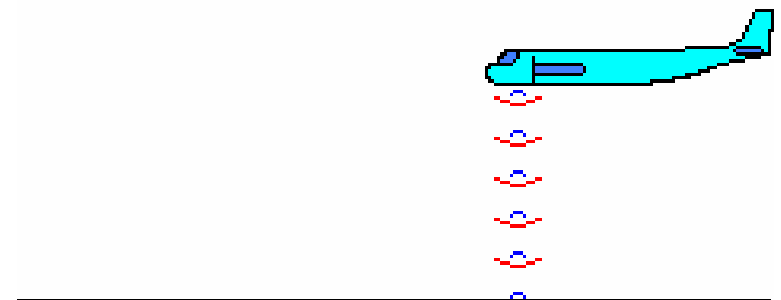
# ONDA DIRETTA

- L'onda diretta è quella che viaggia direttamente dal trasmettitore al ricevitore, per cui questi devono essere visibili l'un l'altro.
- Questo tipo di propagazione viene usato per le microonde delle gamme **VHF, UHF, SHF, EHF**.
- In realtà la traiettoria dell'onda non è esattamente una retta, ma segue quasi la curvatura terrestre determinando degli ampi archi di cerchio a seguito della rifrazione determinata dalla diversa densità degli strati dell'atmosfera al crescere della quota.
- Pertanto è possibile, di fatto, trasmettere al di là dell'orizzonte ottico, e si può calcolare la distanza massima alla quale possono essere poste due antenne che vogliono sfruttare questo tipo di propagazione, con la formula approssimata:

$$D = 4\sqrt{h_{TR}} + 4\sqrt{h_{RIC}}$$

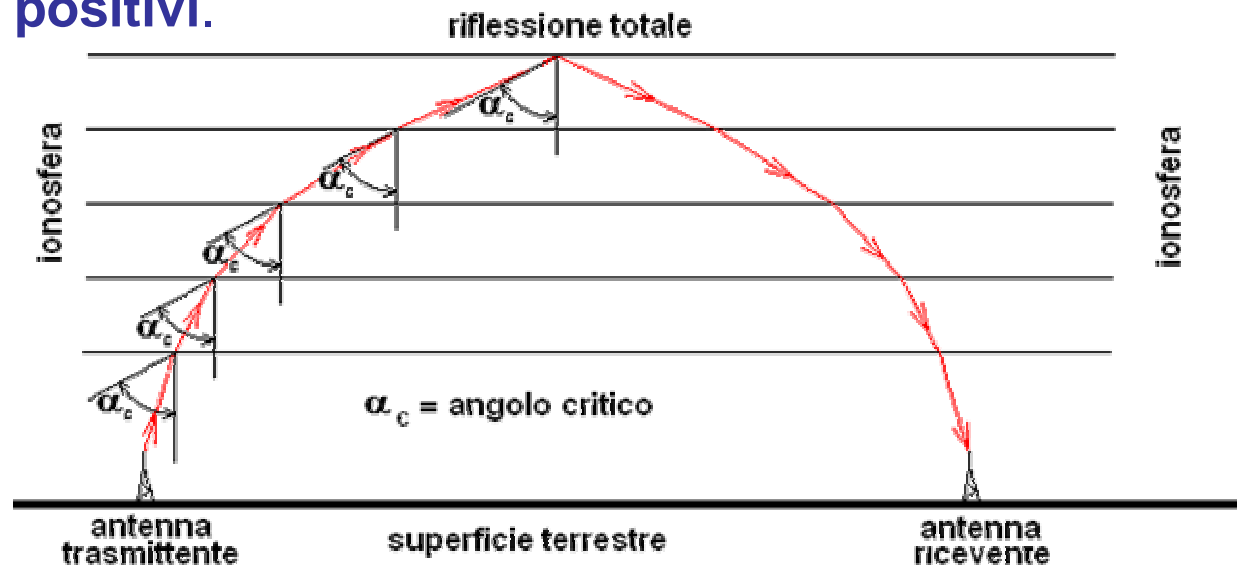
# ONDA RIFLESSA DAL SUOLO

- Due antenne sono collegate, di fatto, oltre che dall'onda diretta, anche da quella che viene riflessa dal suolo, che, di norma intensifica l'onda diretta, talora, invece può creare problemi in quanto, nel riflettersi alla superficie, il campo elettrico si ribalta, ed inoltre, facendo più strada di quella diretta, ed arrivando in ritardo, determinare interferenza o fading
- In taluni casi, l'onda riflessa è invece indispensabile, come ad esempio, nel funzionamento degli altimetri radar degli aerei



# ONDA SPAZIALE

- È detta **onda spaziale**, quell'onda che consente il collegamento a grande distanza, anche con piccole potenze, utilizzando la **riflessione ionosferica**.
- La **ionosfera** è la parte più alta dell'atmosfera ed è esposta, oltre che alla luce visibile del sole, anche ai **raggi ultravioletti**, ai **raggi X** provenienti dal sole, al **vento solare**, ed ai **raggi cosmici** provenienti dallo spazio cosmico.
- Oltre a radiazioni comprendenti il vento solare, i **raggi ultravioletti** e i **raggi X** danno luogo alla **ionizzazione** delle molecole dell'aria costituenti la ionosfera, spezzandone i legami elettrici e generando **elettroni e ioni positivi**.



# TABELLA DELLE FREQUENZE USATE NELLE TRASMISSIONI VIA ETERE

<b>SIGLA</b>	<b>DENOMINAZIONE</b>	<b>DA</b>	<b>A</b>	<b>USI</b>
<b>VLF</b>	<b>VERY LOW FREQUENCY</b>	<b>3KHz</b>	<b>30KHz</b>	<b>TRASMISSIONI CON SOMMERSIBILI</b>
<b>LF</b>	<b>LOW FREQUENCY</b>	<b>30KHz</b>	<b>300KHz</b>	<b>TRASMISSIONI DELLA MARINA</b>
<b>MF</b>	<b>MEDIUM FREQUENCY</b>	<b>300KHz</b>	<b>3MHz</b>	<b>RADIO AM - SISTEMI AEROPORTUALI</b>
<b>HF</b>	<b>HIGH FREQUENCY</b>	<b>3MHz</b>	<b>30MHz</b>	<b>RADIO OC- CB - RADIOCOMANDI - ALLARMI</b>
<b>VHF</b>	<b>VERY HIGH FREQUENCY</b>	<b>30MHz</b>	<b>300MHz</b>	<b>RADIO FM - RADIOAMATORI - TELEVISIONE</b>
<b>UHF</b>	<b>ULTRA HIGH FREQUENCY</b>	<b>300MHz</b>	<b>3GHz</b>	<b>TELEVISIONE - CELLULARI - PONTI RADIO - GPS</b>
<b>SHF</b>	<b>SUPER HIGH FREQUENCY</b>	<b>3GHz</b>	<b>30GHz</b>	<b>RADAR - PONTI RADIO - SATELLITI-</b>
<b>EHF</b>	<b>EXTRA HIGH FREQUENCY</b>	<b>30GHz</b>	<b>300GHz</b>	<b>RADAR - SATELLITI - SONDE SPAZIALI</b>

# BIBLIOGRAFIA

- TOMASSINI – CORSO DI TELECOMUNICAZIONI – ED. THECNA
- AMBROSINI LORENZI – CORSO DI ELETTRONICA SPERIMENTALE  
L'Elettronica e le Telecomunicazioni – ED. TRAMONTANA
- BIONDO SACCHI – IL MANUALE di ELETTRONICA e  
TELECOMUNICAZIONI – ED. HOEPLI
- BUFFA – [www.tuttoilmondodelletelecomunicazioni.it](http://www.tuttoilmondodelletelecomunicazioni.it)