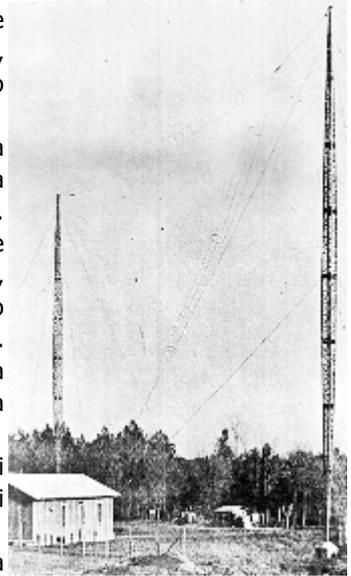


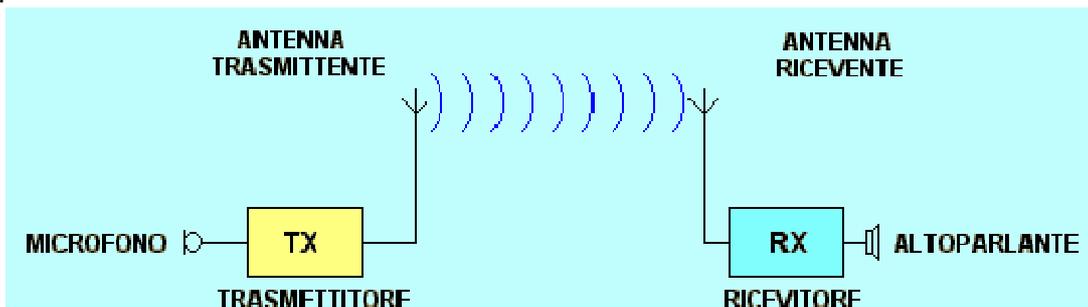
TRASMISSIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE



La trasmissione via etere di segnali viene utilizzata già da un secolo, da quando cioè, Guglielmo Marconi, qui a sinistra in una foto relativa alla sua giovinezza, inventò la radio. A destra: La stazione San Filippo, la prima stazione radiotelegrafica trasmittente realizzata da Guglielmo Marconi a Roma. La trasmissione via etere di segnali viene utilizzata già da un secolo, da quando cioè, Guglielmo Marconi, qui a sinistra in una foto relativa alla sua giovinezza, inventò la radio. A destra: La stazione San Filippo, la prima stazione radiotelegrafica trasmittente realizzata da Guglielmo Marconi a Roma.



Si deve a questo scienziato bolognese il primo esperimento di trasmissione di onde elettromagnetiche via etere a grande distanza e si devono a lui gli studi sulla loro propagazione, studi, però iniziati da Hertz. Ogni trasmissione radio via etere, utilizza due stazioni connesse da una tratta di onde elettromagnetiche che sono collegate per mezzo di due antenne come schematicamente indicato in figura.



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 |
| $3 \cdot 10^{19} \div 3 \cdot 10^8$ | $10^{-9} \div 10^{-16}$ | Raggi gamma |
| $> 3 \cdot 10^{22}$ | $< 10^{-15}$ | Raggi cosmici |

JAMES CLERK MAXWELL



Studiò e scrisse uno studio sulla **Percezione umana dei colori** ed anche la famosissima **Teoria cinetica dei gas**, ma l'opera che certamente lo ha immortalato, scritta a soli 33 anni, è stato il trattato sull'**Elettricità ed il Magnetismo** dove raccolse tutti i risultati degli studi teorici e degli esperimenti pratici effettuati in tutto il mondo di allora sull'argomento. Il secolo in cui visse, infatti, fu particolarmente ricco di scoperte ed esperimenti scientifici che però avvenivano in parti molto lontane del globo e che quindi non sempre erano collegate fra loro e cioè:

- Pila elettrica inventata nel 1800 da Alessandro Volta (1745 - 1827)
- Forze elettrodinamiche scoperte da André Marie Ampère (1775 - 1827)
- Effetti magnetici della corrente scoperti da Hans Christian Oersted (1777 - 1851)
- Legge sulla resistenza elettrica scritta nel 1826 di Georg Simon Ohm (1787 - 1854)
- Forza di attrazione fra cariche di Charles Augustin De Coulomb (1736 - 1806)
- Teorema sul flusso di induzione scritto da Karl Friedrich Gauss (1777 - 1855)

- Legge dell'induzione elettromagnetica scritta da Michael Faraday (1791 - 1867)
- Egli inoltre riuscì a collegare gli effetti elettrici e magnetici della materia dimostrandone l'interazione relativa e quindi, finalmente, prevedendo l'esistenza di **onde elettromagnetiche**, quale alternanza dei campi elettrici e magnetici, che si propagano nello spazio ad una velocità che dimostrò dover essere, in base ai suoi calcoli e alle sue formule, la stessa della **velocità della luce**, allora già nota.

Le equazioni sono quattro:

| N° | EQUAZIONI INTEGRALE | IN FORMA | EQUAZIONI IN FORMA DIFFERENZIALE | LEGGES FISICHE CORRISPONDENTE |
|------|---|----------|---|--|
| I° | $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon}$ | | $\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$ | LEGGES DI GAUSS |
| II° | $\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$ | | $\text{div } \vec{B} = 0$ | LE LINEE DEL CAMPO MAGNETICO SONO CHIUSE |
| III° | $\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ | | $\text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$ | LEGGES DI INDUZIONE DI FARADAY |
| IV° | $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \left(I + \epsilon \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$ | | $\text{rot } \vec{B} = \mu \left(\vec{J} + \epsilon \frac{d\vec{E}}{dt} \right)$ | LEGGES DELLA CIRCUITAZIONE DI AMPERE |

ATTENUAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE

L'attenuazione in oggetto, non è quella naturale dovuta alla distribuzione dell'energia in un ventaglio sempre più ampio, man mano che ci si allontana dalla sorgente immaginata puntiforme, come avviene con un'antenna isotropa e chiamata in gergo attenuazione dello spazio libero:

$$A_d = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2$$

Questa attenuazione è dovuta, invece, 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, a tutti noto oggi, dell'ozono nell'alta atmosfera, che ci protegge dai raggi ultravioletti del sole.

Questi raggi, che sono onde elettromagnetiche come tutte le altre, entrando nell'atmosfera urtano contro le molecole dell'ozono presenti nell'aria e si attenuano fortemente cedendo loro quell'energia che per noi potrebbe essere dannosa.

Questo tipo di attenuazione varia molto con la lunghezza d'onda.

Basti pensare che quando il cielo è coperto, la radio e la televisione si ricevono lo stesso, cioè le lunghezze d'onda usate per la radio e per la TV sono indifferenti alquanto all'umidità dell'aria, mentre non lo è per niente la luce visibile, tanto è vero che noi vediamo le nuvole, cioè queste sono opache ai raggi luminosi, anch'essi onde elettromagnetiche, ma di lunghezza d'onda diversa.

Esistono poi dei radar che bucano le nubi, e radar che vedono le nubi, come quelli meteorologici, cioè al variare della frequenza usata, l'assorbimento delle onde elettromagnetiche causato dalle nuvole è molto diverso.

DIFFRAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE

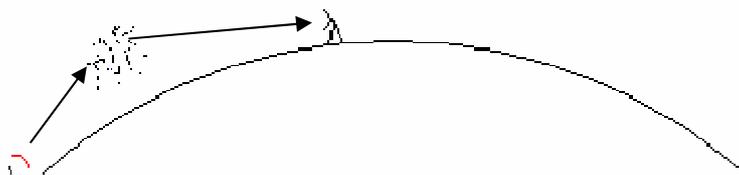
La diffrazione è un fenomeno fisico in base al quale l'onda può propagarsi al di là di un ostacolo delle dimensioni della propria lunghezza d'onda.

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 il pulviscolo, 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 nell'animazione seguente, che descrive i ponti radio a diffusione troposferica.



In questo tipo di trasmissione, però, che consente collegamenti a distanze dell'ordine di **400 Km**, a causa del fading alquanto discontinuo, è necessario, per avere una continuità di esercizio, trasmettere con potenze dell'ordine dei **KW**.

FORMULA FONDAMENTALE DELLA TRASMISSIONE

Un'antenna isotropa trasmette una potenza P_{tr} con la stessa intensità in tutte le direzioni dello spazio circostante, ma la potenza irradiata si suddivide in un'area sempre maggiore man mano che l'onda si allontana dall'antenna.

Essendo:

$$4 \pi r^2$$

la superficie della sfera di raggio r , la potenza S che attraversa un m^2 di superficie sferica ortogonale alla direzione di propagazione è:

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

Ma le antenne isotrope non esistono, sono solo un'astrazione matematica utile come valore di riferimento.

Tutte le antenne reali hanno tutte 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 di $1m^2$ normale alla direzione di propagazione, risulta, di fatto, moltiplicata per il guadagno di detta antenna nella direzione della propagazione:

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

Volendo calcolare poi la potenza P_{ric} raccolta da un'antenna di area equivalente:

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

Si ottiene finalmente:

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

Poiché il termine:

$$A_{sl} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2$$

si chiama attenuazione dello spazio libero, la formula suddetta, che assume il nome di formula fondamentale della trasmissione, perché collega la potenza del ricevitore P_{ric} con la potenza del trasmettitore P_{tr} , si semplifica come segue:

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

la quale è molto spesso calcolata in decibel:

$$P_{ric} (dB_m) = P_{tr} (dB_m) + G_{tr} (dB) + G_{ric} (dB) - A_{sl} (dB)$$

dove i simboli hanno i seguenti significati in base alla definizione di dB e dBm:

$$P_{ric} (dB_m) = 10 \log_{10} P_{ric} (mW)$$

$$P_{tr} (dB_m) = 10 \log_{10} P_{tr} (mW)$$

$$G_{tr} (dB) = 10 \log_{10} G_{tr}$$

$$G_{ric} (dB) = 10 \log_{10} G_{ric}$$

$$A_{sl} (dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)$$

FADING

Il FADING è un fenomeno in base al quale un segnale 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.

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:

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

Dove:

- **D** è la distanza in Km fra le due antenne
- **h_{TR}** è l'altezza in metri della antenna trasmittente
- **h_{RIC}** è l'altezza in metri dell'antenna ricevente

Inutile dire che norme prudenziali, legate alla stabilità e sicurezza del funzionamento, suggeriscono di restare alquanto all'interno di questa distanza massima teorica di trasmissione.

Da questa formula si può anche, inversamente, calcolare l'altezza minima che devono avere due antenne per essere in collegamento, ad una data distanza, con questo tipo di propagazione.

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, come si vede schematicamente dall'animazione seguente.



In taluni casi è invece indispensabile, come ad esempio, nel funzionamento degli altimetri radaristici degli aerei, o dei missili che devono volare a precise quote per non farsi intercettare, o nel rilievo della forma della superficie terrestre dai satelliti artificiali, o, per quelle antenne che utilizzano l'effetto immagine della superficie terrestre per aumentare il proprio guadagno.

Nell'altimetro radaristico, l'aereo emette un'onda radar che colpisce la terra e, dal tempo impiegato per tornare all'apparecchio, si calcola la quota.



ONDA SPAZIALE

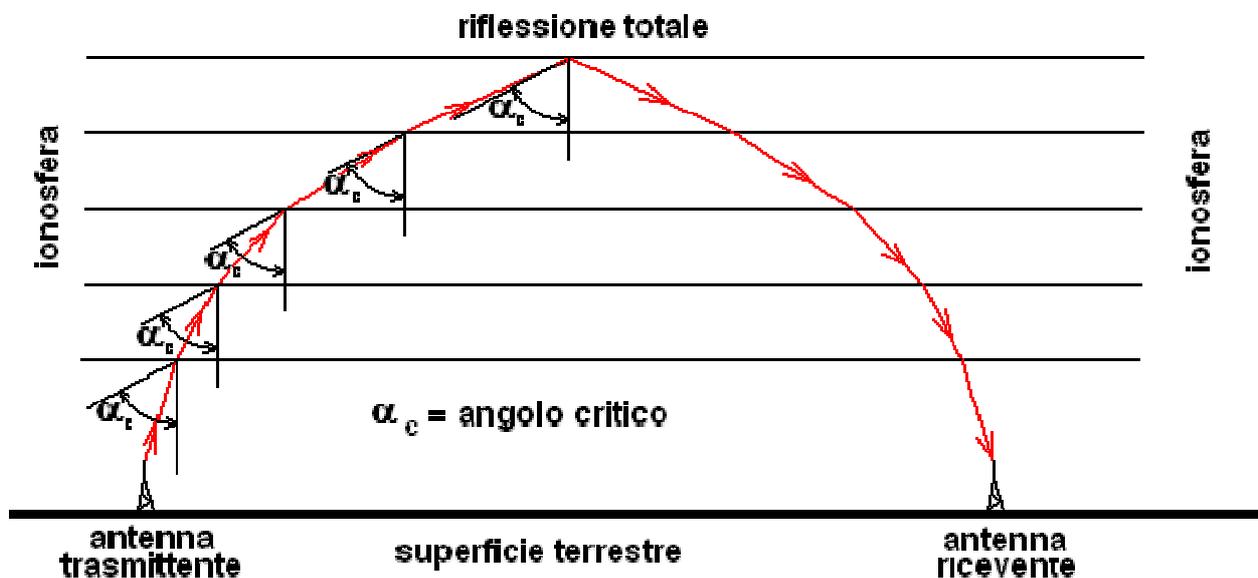
E' detta onda spaziale o sky wave, quell'onda che consente il collegamento a grande distanza, anche con piccole potenze, utilizzando la riflessione ionosferica.

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.

Sia i raggi ultravioletti, che i raggi X ed i raggi cosmici, oltre a radiazioni comprendenti il vento solare, danno luogo alla ionizzazione delle molecole dell'aria costituenti la ionosfera, spezzandone i legami elettrici e generando elettroni, ioni positivi ed ioni negativi.

Si vengono a determinare delle larghe fasce, nella ionosfera, in cui sono presenti dunque, oltre agli atomi e alle molecole, anche ioni ed elettroni in un fluire caotico dovuto anche all'agitazione termica, di particelle di carica opposta che casualmente si generano e casualmente si ricombinano, e che hanno un effetto sulla propagazione delle onde elettromagnetiche.

Al variare della concentrazione di queste cariche, alle varie quote, l'indice di rifrazione degli strati di aria si riduce andando verso l'alto, in modo che, per le frequenze al di sotto di una particolare frequenza critica che si aggira circa sui 30 MHz, la ionosfera si comporta come uno specchio che, per successive rifrazioni, devia i raggi fino a quando, superato l'angolo critico, dà luogo alla riflessione totale, rimandando i raggi verso la terra a grande distanza dal punto di partenza, come indicato nel disegno.



I raggi che partono con angoli sempre maggiori, rispetto all'orizzontale, tornano a terra a distanze sempre più piccole, fino a quel particolare angolo, in corrispondenza del quale il raggio non torna più a terra, buca la ionosfera e perdendosi nello spazio.

Esiste una distanza dal trasmettitore detta zona di silenzio non raggiunta dalle onde che invece si presentano a distanza maggiore.

Inoltre è possibile talora che le onde spaziali, provenienti dalla ionosfera, toccando terra si riflettano ancora una volta dando luogo ad un altro salto a distanza anche se con maggiore attenuazione.

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 1000 chilometri.

Per le loro caratteristiche, erano usate per il sistema dei radiofari LORAN ora superato dal GPS.

RIFLESSIONE E RIFRAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE

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.

La luce si propaga nel vuoto alla velocità costante di:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m / sec}$$

In qualunque altro mezzo trasparente, la velocità della luce è sempre di poco inferiore a questo valore.

Nell'acqua è di circa:

$$v = 2,25 \cdot 10^8 \text{ m / sec}$$

nel vetro, invece, è di circa:

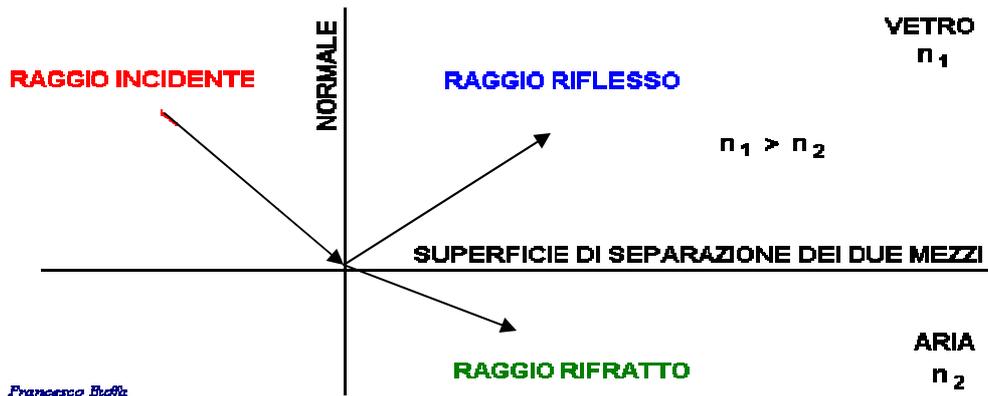
$$v = 2 \cdot 10^8 \text{ m / sec}$$

Si definisce indice di rifrazione **n** il rapporto fra la velocità della luce nel vuoto **c**, e la velocità della luce **v**, in un altro mezzo.

$$n = \frac{c}{v}$$

Esistono quindi tanti indici di rifrazione **n** quanti sono i mezzi trasparenti.

Un raggio luminoso, che si propaga in un mezzo trasparente, ad esempio il vetro, con indice di rifrazione **n1** ed incontra un altro mezzo pure trasparente, con indice di rifrazione **n2** 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.

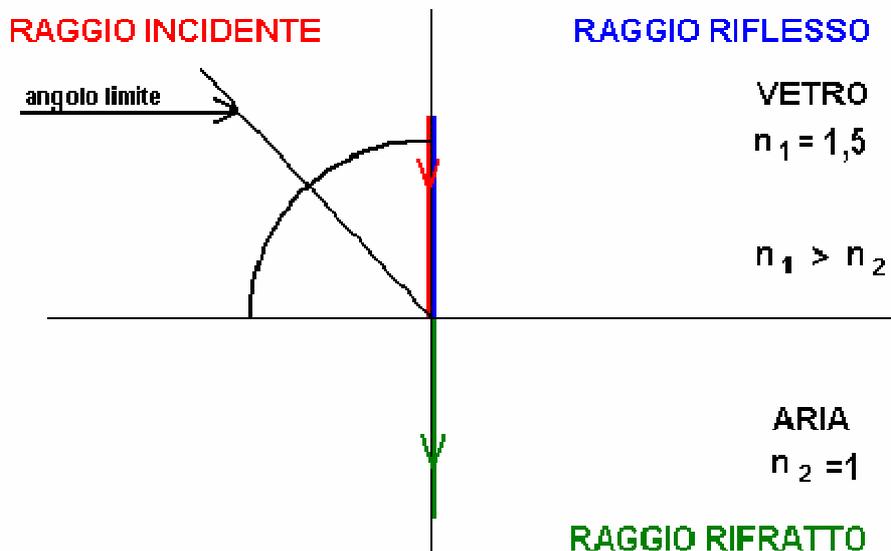
Cioè, in formula, con riferimento alla figura di sopra.

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:

$$\frac{\sin\Phi_1}{\sin\Phi_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Poiché $n_1 > n_2$, di conseguenza $\Phi_2 > \Phi_1$, ma $\sin\Phi_1$ può assumere al massimo il valore di 1, cui corrisponde un angolo di rifrazione di 90° , cioè praticamente l'assenza di rifrazione.

Si deduce, come conseguenza che, al crescere dell'angolo di **incidenza**, anche l'angolo di **rifrazione** cresce, ma più rapidamente, fino a che, quando il primo raggiunge il valore detto **angolo limite**, il secondo raggiunge il valore di 90° , **non dando più luogo a rifrazione**, come si vede dall'animazione seguente.



CLASSIFICAZIONE FREQUENZE USATE NELLE TELECOMUNICAZIONI

| SIGLA | DENOMINAZIONE | DA | A | USI |
|-------|--------------------|--------|--------|---------------------------------|
| VLF | VERY LOW FREQUENCY | 3KHz | 30KHz | TRASMISSIONI CON SOMMERGIBILI |
| LF | LOW FREQUENCY | 30KHz | 300KHz | TRASMISSIONI DELLA MARINA |
| MF | MEDIUM FREQUENCY | 300KHz | 3MHz | RADIO AM - SISTEMI AEROPORTUALI |

| | | | | |
|------------|---------------------------------|---------------|---------------|--|
| HF | HIGH FREQUENCY | 3MHz | 30MHz | RADIO OC- CB - RADIOCOMANDI - ALLARMI |
| VHF | VERY HIGH FREQUENCY | 30MHz | 300MHz | RADIO FM - RADIOAMATORI - TELEVISIONE |
| UHF | ULTRA HIGH FREQUENCY | 300MHz | 3GHz | TELEVISIONE - CELLULARI - PONTI RADIO - GPS |
| SHF | SUPER HIGH FREQUENCY | 3GHz | 30GHz | RADAR - PONTI RADIO - SATELLITI- |
| EHF | EXTRA HIGH FREQUENCY | 30GHz | 300GHz | RADAR - SATELLITI - SONDE SPAZIALI |