



**Sezione
di
Pisa**

***ARI - CRT Toscana
Corso per aspiranti Radioamatori 2025***

LEZIONE 18

La Propagazione delle Onde Radio

© i5WHC – 3 Settembre 2025



Sezione
di
Pisa

Argomenti della Lezione

- ***I campi Elettromagnetici***
- ***La propagazione delle onde radio***
- ***La propagazione ionosferica e il ciclo solare***

Campo Elettromagnetico

Un po' di Storia

I primi studi dei fenomeni fisici relativi all'elettromagnetismo risalgono alla prima metà del '800. I nomi dei principali scienziati che hanno studiato la materia ci risultano familiari perché i loro nomi spesso sono stati associati alle principali unità di misura



Michael Faraday 1791-1867 Fisico Inglese, si devono a lui i primi studi sull'induzione elettromagnetica (leggi di Farady)



Heinrich Friedrich Emil Lenz 1804-1865 Fisico Russo, si devono a lui i primi studi sulla forza elettromotrice indotta da un campo magnetico in variazione (legge di Lenz)



Joseph Henry 1797-1878 Fisico Statunitense, si dedicò allo studio delle correnti indotte realizzando i primi modelli di elettromagnete, si deve a lui l'elaborazione del primo modello di motore elettrico



André-Marie Ampère 1775-1836 Fisico Francese, dette un contributo determinante ai primi studi sull'elettromagnetismo ed in particolare sulla relazione che esiste tra la corrente che scorre in un conduttore e il campo magnetico concatenato che si genera (legge di Ampere)



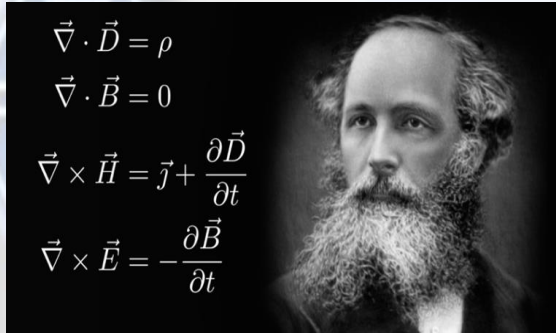
Carl Friedrich Gauss 1777-1855 Matematico e Fisico Tedesco, si deve a lui la formulazione di una importante legge relativa al campo elettrico (teorema del flusso) nota appunto come legge di Gauss



Heinrich Rudolf Hertz 1857-1894 Fisico Tedesco, Per primo dimostrò sperimentalmente l'esistenza delle onde elettromagnetiche con un apparato di sua costruzione, il dipolo hertziano

Campo Elettromagnetico

Un po' di Storia



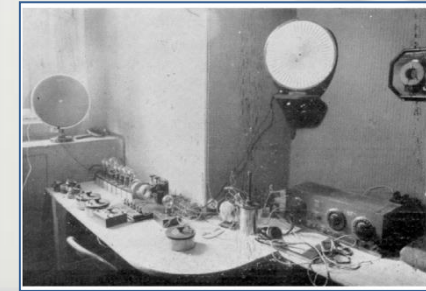
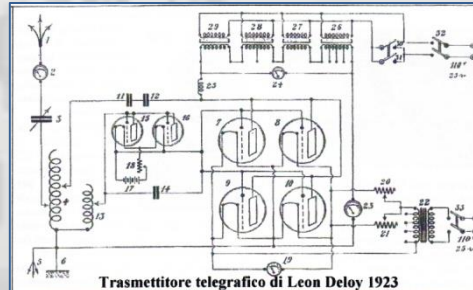
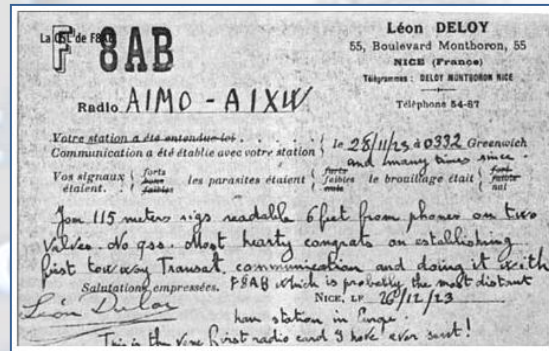
La svolta epocale si ha nel 1873 quando il fisico scozzese **James Clerk Maxwell** elabora la prima teoria moderna sull'elettromagnetismo formulando un modello matematico (***Equazioni di Maxwell***) che sarà la base per l'evoluzione degli studi successivi sui campi elettromagnetici. Il modello matematico elaborato da Maxwell dimostra come ***campi elettrici e campi magnetici «in variazione» siano sempre tra loro correlati dando origine un «campo elettromagnetico» che si propaga nello spazio sotto forma di onde*** ad una velocità $C=299792458$ m/s (velocità della luce).



Guglielmo Marconi 1874-1937 - La possibilità di sfruttare i campi elettromagnetici per le comunicazioni a distanza si deve però a **Guglielmo Marconi** che nel 1901, sfidando i pareri contrari della comunità accademica dell'epoca, riuscì a dimostrare sperimentalmente la possibilità che un campo elettromagnetico potesse propagarsi a grande distanza realizzando il **12 dicembre 1901** il primo collegamento radio transoceanico tra Poldhu in Inghilterra e San Giovanni di Terranova in Canada.

Campo Elettromagnetico

Un po' di Storia



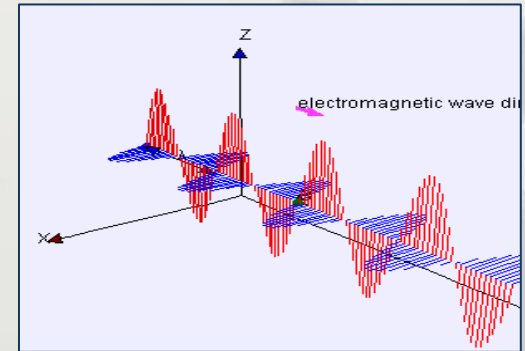
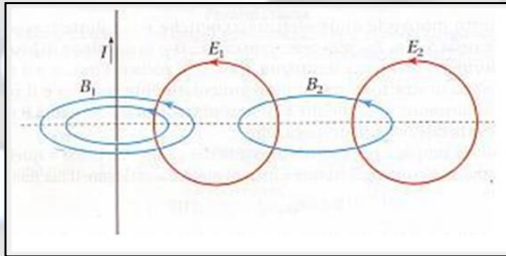
Ma c'è un'altra data che mi piace ricordare e che ci riguarda più da vicino:

La notte del 27 Novembre 1923 alle 03:32z due OM, l'americano Fred Schnell A1MO e il Francese Léon Deloy F8AB, stabilirono il primo contatto radio transoceanico in HF con apparati di "debole potenza" operanti sulla lunghezza d'onda di 103 mt. (2,9 MHz) dimostrando così la superiorità delle "onde corte" nei collegamenti a lunga distanza rispetto a quanto fatto alcuni anni prima (1901) da Guglielmo Marconi con l'impiego però di sistemi ad onda lunga e apparati di notevole potenza.

Campo Elettromagnetico

I Fondamentali

*Il modello elaborato da Maxwell dimostra che ad un campo elettrico in variazione è sempre concatenato ad un campo magnetico anch'esso in variazione e viceversa, quindi i campi elettrico e magnetico si sostengono a vicenda e si propagano linearmente nello spazio in modo sferico rispetto alla sorgente (come la luce generata da una lampadina) **dando origine ad un' onda elettromagnetica in cui i due campi sono sempre tra loro perpendicolari***



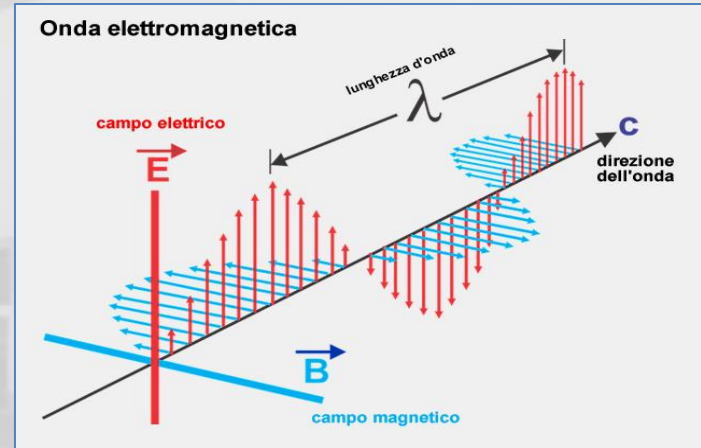
Campo Elettromagnetico

I Fondamentali

Nello spazio libero tra campo elettrico E e campo magnetico H il rapporto è costante e vale $E/H = 377 \Omega$ (**impedenza dello spazio libero**) e il campo si propaga in linea retta a velocità « v » il cui valore dipende dalle caratteristiche del «mezzo» in cui si propaga. La massima velocità si ha nel vuoto dove $v = c$ (velocità della luce $3 \cdot 10^8$ Km/s). La velocità è uguale al prodotto tra frequenza « f » e lunghezza d'onda « λ », relazione che definiremo meglio più avanti.

$$v = c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

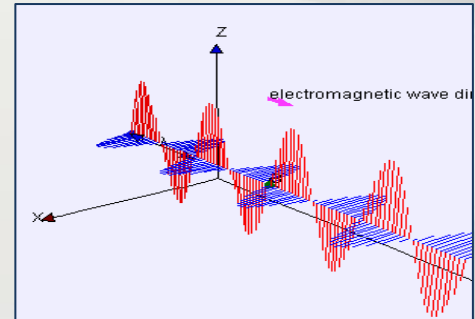
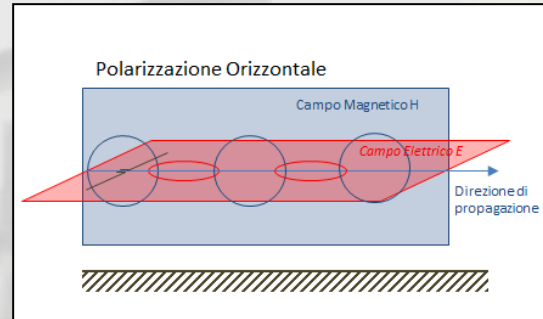
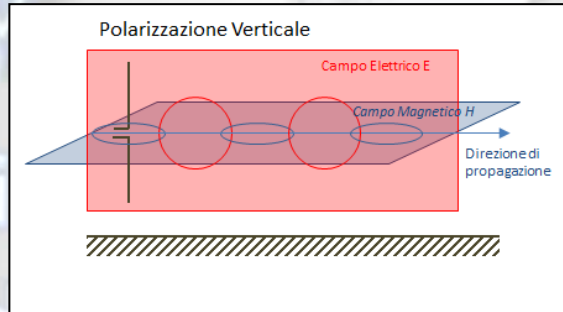
$$\lambda \text{ (m)} = \frac{300}{f \text{ (MHz)}}$$



Campo Elettromagnetico

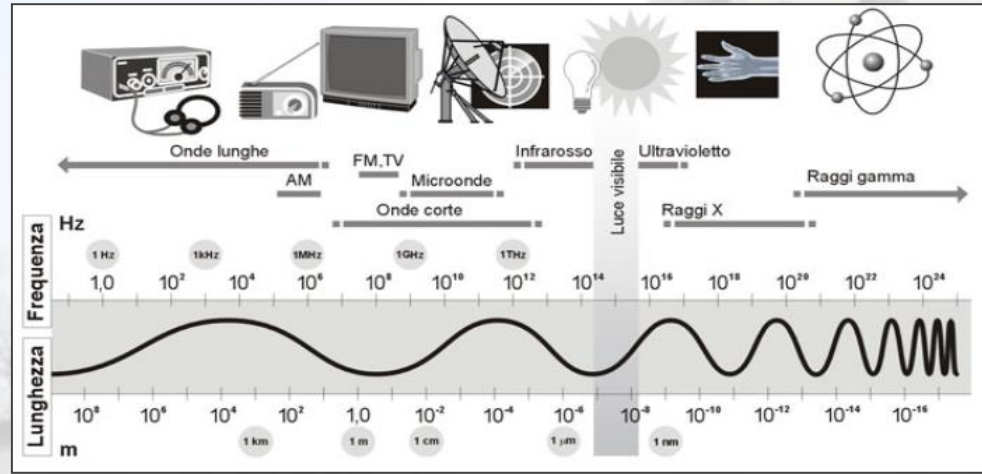
I Fondamentali

*Abbiamo già visto come i campi E e H siano sempre tra loro perpendicolari e si definisce «**polarizzazione**» di un' onda elettromagnetica **il piano, rispetto a terra, su cui giacciono le linee di forza del «Campo Elettrico E »***



Campo Elettromagnetico

Lo spettro Elettromagnetico



Onde Radio, Radiazione Termica (calore), Radiazione Luminosa (luce visibile), Radiazione ultravioletta, Raggi X, Raggi Gamma, aspetti diversi di uno stesso fenomeno in cui la differenza è data solo dalla lunghezza d'onda, l'insieme prende il nome di «spettro elettromagnetico»

Ci focalizzeremo adesso su una specifica parte di nostro interesse dello spettro elettromagnetico: Le Onde Radio

Campo Elettromagnetico

Le Onde Radio

Prende nome di Onde Radio quella parte dello spettro elettromagnetico compreso tra 3×10^3 Hz e 3×10^{11} Hz (3KHz – 300GHz)

ONDE RADIO	FREQUENZA	LUNGHEZZA	SORGENTI	UTILIZZAZIONE
EHF Extremely High Frequency	da 300 a 30 GHz	da 1 a 10 mm	Ponti radio, Satelliti	Comunicazione
SHF Super High Frequency	da 30 a 3 GHz	da 1 a 10 cm	Ponti radio, Satelliti	
UHF Ultra High Frequency	da 3 GHz a 300 MHz	da 10 cm a 1 mm	Emittenti radio, Tv	Radio amatori, Radio FM, Controllo, Tv
VHF Very High Frequency	da 300 MHz a 30 MHz	da 1 a 10 m	Emittenti radio, Tv	Tv, Radio amatori
HF High Frequency	da 30 MHz a 3 MHz	da 10 a 100 m	Emittenti radio	Radio, Marina, Aviazione, Polizia
MF Medium Frequency	da 3 MHz a 300 kHz	da 100 a 1.000 m	Emittenti radio	Radio AM, Radio amatori
LF Low Frequency	da 300 a 30 kHz	da 1 a 10 km	Emittenti radio	Radio
VLF Very Low Frequency	da 30 a 3 kHz	da 10 a 100 km	Emittenti radio, Strumenti elettronici	Radio, Registrazione audio
ELF Extremely Low Frequency	da 3 kHz a 30 Hz	da 100 a 10.000 km	Strumenti elettronici, linee elettriche	Comunicazione edei sottomarini, telefono, telegrafo

Campo Elettromagnetico

La Lunghezza d'onda

La lunghezza d'onda si indica con la lettera greca λ (lambda). Il suo valore può essere **espressa in metri** o nei suoi multipli o sottomultipli. E' definita come **lo spazio percorso da un ciclo (oscillazione) che si propaga alla velocità C** (che nel vuoto vale $3 \times 10^8 \text{ Km/s}$).

Come abbiamo già visto tra lunghezza d'onda e frequenza f c'è una proporzionalità inversa

$$\lambda = \frac{C}{f} \Rightarrow f = \frac{C}{\lambda} \Rightarrow C = f * \lambda$$

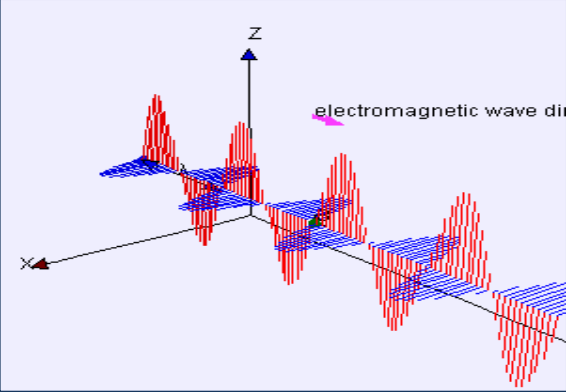
Dove:

f = frequenza (numero di oscillazioni in un secondo)

λ = Lunghezza d'onda

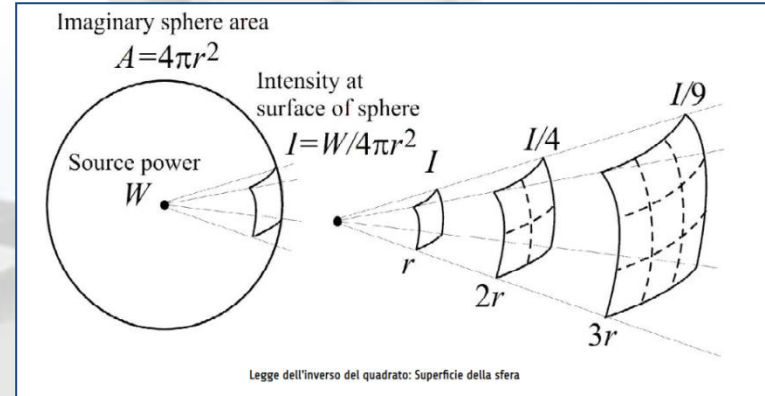
C = velocità di propagazione,

$$\lambda_{(mt)} = \frac{300}{f_{(MHz)}}$$



La propagazione delle Onde Radio

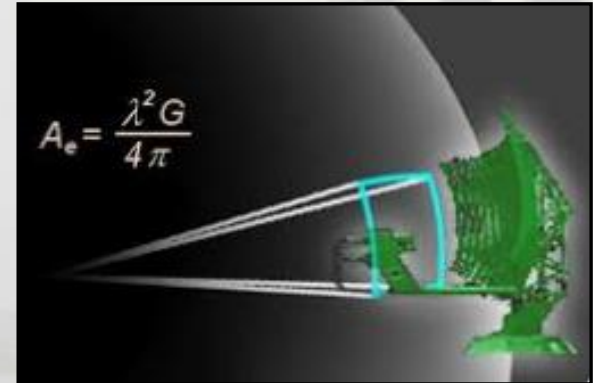
Come abbiamo già visto un'onda elettromagnetica, a partire dalla sorgente, si propaga in tutte le direzioni **in linea retta nello spazio libero** (ovvero in assenza di elementi che ne possano modificare il percorso). La propagazione avviene quindi in modo sferico e **l'intensità del campo si riduce con il quadrato della distanza** questo perché l'energia irradiata si distribuisce su una superficie sferica sempre più grande all'aumentare della distanza.



Si definisce Area effettiva A_e di un'antenna la superficie equivalente da cui l'antenna stessa estrae l'energia elettromagnetica da fornire al ricevitore in ricezione.

La dimensione di tale superficie dipende dalla lunghezza d'onda e dal guadagno dell'antenna, e nel caso dell'antenna isotropica (guadagno unitario) vale:

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



La propagazione delle Onde Radio

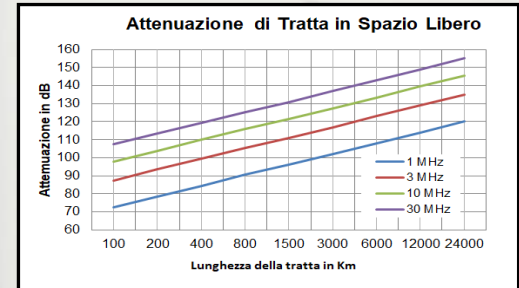
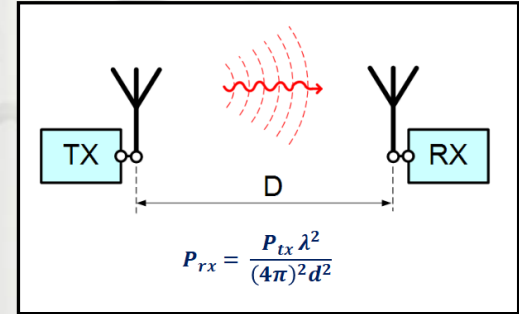
Attenuazione dovuta alla distanza

Sulla base di quanto abbiamo visto nella slide precedente possiamo quindi affermare che, **nello spazio libero**, ovvero in assenza di elementi che possano alterare o modificare il percorso di un'onda EM, **L'attenuazione è direttamente proporzionale al quadrato della distanza e inversamente proporzionale al quadrato della lunghezza d'onda**.

Esprimendo il valore in dB, l'attenuazione dovuta alla distanza, al netto del guadagno delle antenne vale:

$$A_{(dB)} = 32,4 + 20 \log_{10} D_{(Km)} + 20 \log_{10} f_{(MHz)}$$

E' bene quindi ricordare sempre che, a prescindere da altri fattori che potranno intervenire ad incrementare ulteriormente l'attenuazione a seconda delle diverse modalità di propagazione di un'onda EM, modalità che vedremo in dettaglio nelle slide successive, **L'attenuazione di un segnale radio aumenta sempre all'aumentare della distanza e della frequenza**.



La propagazione delle Onde Radio

All'inizio dello studio dei campi elettromagnetici negli scienziati dell'epoca era radicata la convinzione, peraltro supportata dalla teoria, che un campo elettromagnetico, propagandosi in linea retta, non potesse essere utilizzato per comunicazioni oltre l'orizzonte.

Come è noto si deve all'intuito e alla tenacia di Guglielmo Marconi la dimostrazione pratica che un'onda radio possa superare anche un ostacolo e propagarsi ben oltre l'orizzonte sebbene all'epoca non se ne conoscessero le motivazioni.

Si dovette infatti attendere circa 25 anni prima che gli studi potessero dimostrare quale fosse il motivo che permetteva ad un'onda radio di propagarsi oltre l'orizzonte

La propagazione delle Onde Radio



*Oliver
Heaviside*



*Arthur Edwin
Kennelly*

I primi a formulare un'ipotesi scientifica circa il coinvolgimento della parte alta dell'atmosfera terrestre nella propagazione delle onde radio sono stati gli scienziati Oliver Heaviside (UK) e Arthur Edwin Kennelly (USA) nel 1902.



*Edward
Appleton*



*Robert
Watson-Watt*

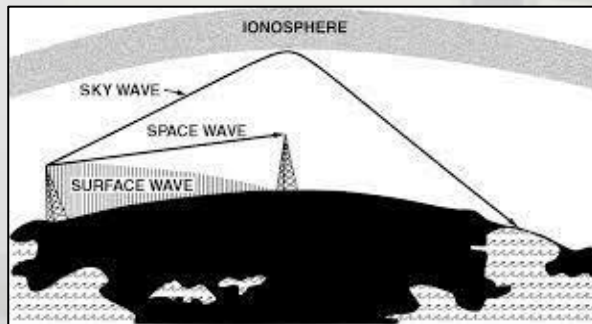
Solo successivamente però, nel 1925, fu dimostrata da Edward Appleton la presenza di strati ionizzati riflettenti nell'alta atmosfera e per questo gli fu assegnato nel 1947 il Nobel per la fisica. Successivamente nel 1929 fu Robert Watson Watt, padre del radar, ad introdurre il concetto di "ionosfera" come insieme di aree (strati) con differente livello di ionizzazione, coniando di fatto il neologismo «ionosfera» divenuto poi di uso comune

La propagazione delle Onde Radio

E' quindi la presenza dell'atmosfera terrestre ed in particolare la sua composizione e le diverse caratteristiche che presenta alle varie altezze, che permettono ad un'onda radio di propagarsi a grande distanza oltre l'orizzonte.

In funzione della frequenza usata e della zona di atmosfera attraversata da un fascio radio possiamo identificare diversi meccanismi di propagazione :

- *Propagazione nello Spazio Libero (Line-of-sight)*
- *Propagazione per onda di terra (Surface or Ground Wave)*
- *Propagazione troposferica (Tropo Scatter)*
- *Propagazione Ionosferica (Skywave)*



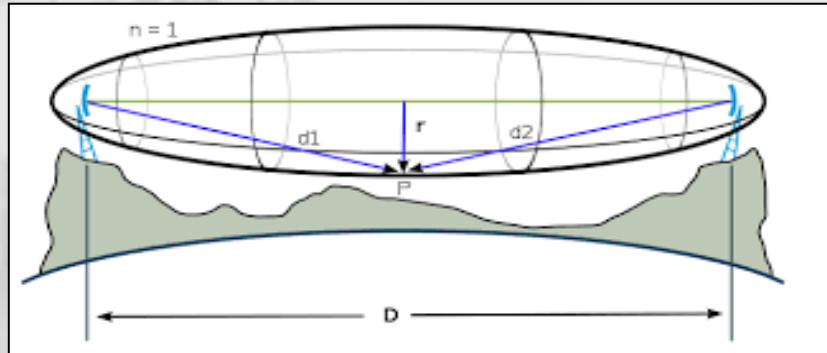
La propagazione delle Onde Radio

Propagazione nello Spazio Libero (Line-of-sight)

Parliamo di «**Propagazione nello spazio libero**» quando i due estremi della tratta sono in piena visibilità (portata ottica) e lo spazio in cui si propaga il campo EM è totalmente libero da ostacoli che possano causarne una deviazione o un assorbimento. **In questo caso la propagazione avviene in linea retta** e l'attenuazione del segnale è proporzionale solo alla frequenza e alla distanza secondo la seguente relazione:

$$A_{dB} = 32,4 + 20 \log_{10}(D_{Km}) + 20 \log_{10}(f_{MHz})$$

E' il caso tipico dei ponti radio a microonde che utilizzano antenne direttive a fascio molto stretto per cui l'area in cui si propaga il segnale (ellissoide di Fresnell) è priva di ostacoli.



La propagazione delle Onde Radio

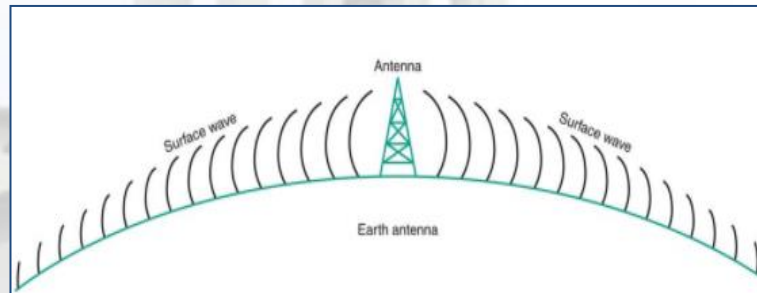
Propagazione per onda di terra (Surface or Ground Wave)

E' il modo prevalente con cui si propagano le onde EM in prossimità del suolo a distanza relativamente breve dall'antenna emittente.

L'intensità dell'onda di terra decresce rapidamente in funzione della distanza, della frequenza ed, in particolare, delle caratteristiche dielettriche del suolo in cui parte dell'energia viene dissipata dalle correnti indotte.

Proprio a causa di questa particolare caratteristica l'attenuazione dell'onda di terra risulta minore nel caso di campi con polarizzazione verticale in quanto in questo caso la componente di campo elettrico è perpendicolare al suolo

Per questi motivi la propagazione per onde di terra è utilizzabile solo nello spettro delle LF e MF e limitatamente nella parte bassa dello spettro delle HF dove per poter coprire distanze significative è comunque necessario l'impiego di elevati livelli di potenza, l'onda di terra ha però il vantaggio di poter seguire la curvatura terrestre e quindi di potersi propagare anche oltre la linea dell'orizzonte.

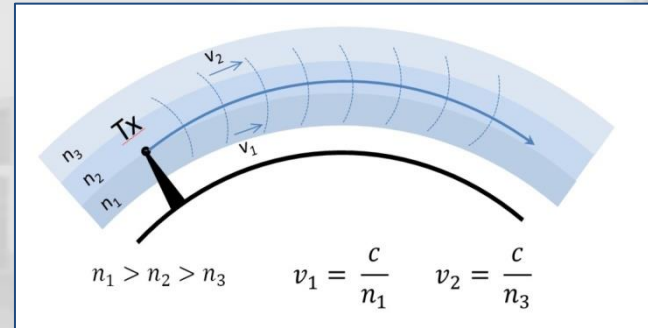
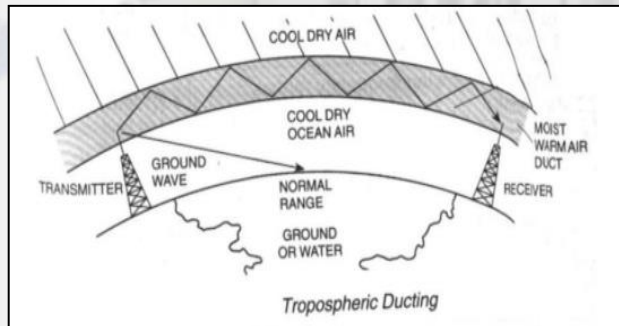


La propagazione delle Onde Radio

Propagazione troposferica (Tropo Scatter)

Parliamo di **Propagazione Troposferica** quando l'onda EM attraversa gli strati più bassi dell'atmosfera tra 0 e 10 Km di altezza (Troposfera) subendo una **rifrazione**, un fenomeno che si manifesta indipendentemente dalla frequenza ma che **viene utilizzato prevalentemente a frequenze elevate (VHF – UHF)** dove, come vedremo più avanti, non ha effetto la propagazione ionosferica

Analogamente a quanto avviene in ambito ottico, l'onda elettromagnetica che attraversa strati d'aria a diversa densità subisce una deviazione (rifrazione) che può portare il campo ad essere deviato fino a raggiungere terra ben oltre l'orizzonte. In questo modo si possono coprire distanze massime che possono raggiungere e, in certi particolari casi (Duct), superare gli 800-1000Km.

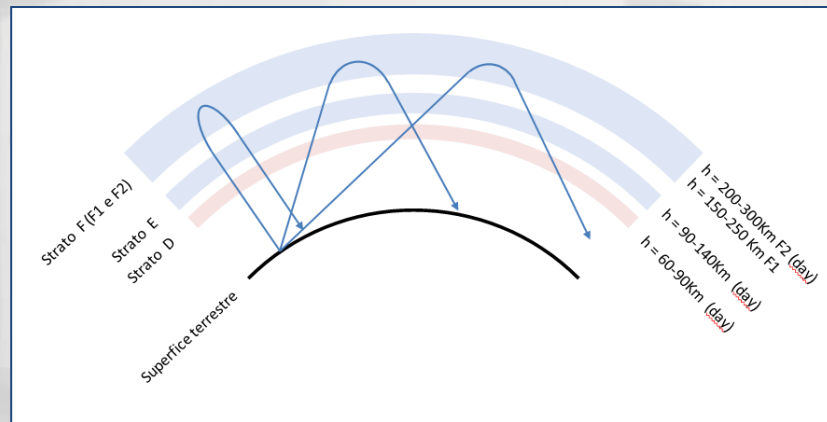


La propagazione delle Onde Radio

Propagazione Ionosferica (Skywave)

Parliamo invece di **Propagazione Ionosferica** quando l'onda EM raggiunge gli strati più alti dell'atmosfera tra 100 e 400 Km di altezza (Ionosfera) prima di essere deviata di nuovo a terra, un fenomeno che si presenta però, come vedremo, **solo in un ristretto range di frequenza compreso tra MF e HF in funzione del livello di ionizzazione della ionosfera stessa, livello che a sua volta dipende principalmente dalla radiazione solare e che solo raramente raggiunge livelli tali da interessare frequenze superiori a 30-40 MHz.**

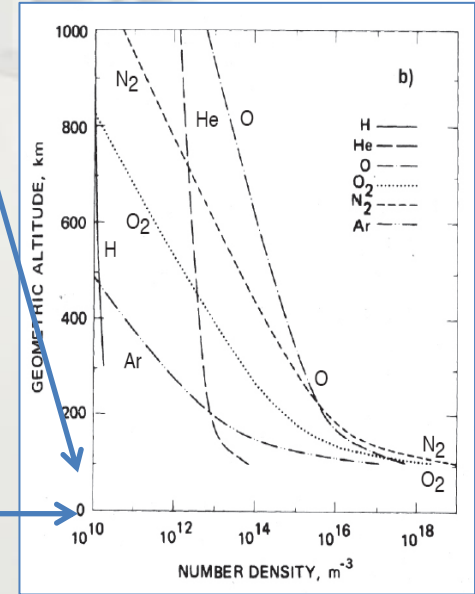
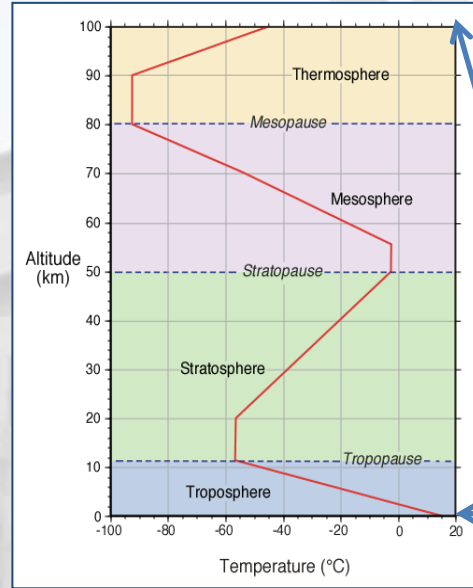
I meccanismi che regolano la propagazione ionosferica sono estremamente complessi, proveremo a darne una breve spiegazione delle slide successive



La propagazione delle Onde Radio

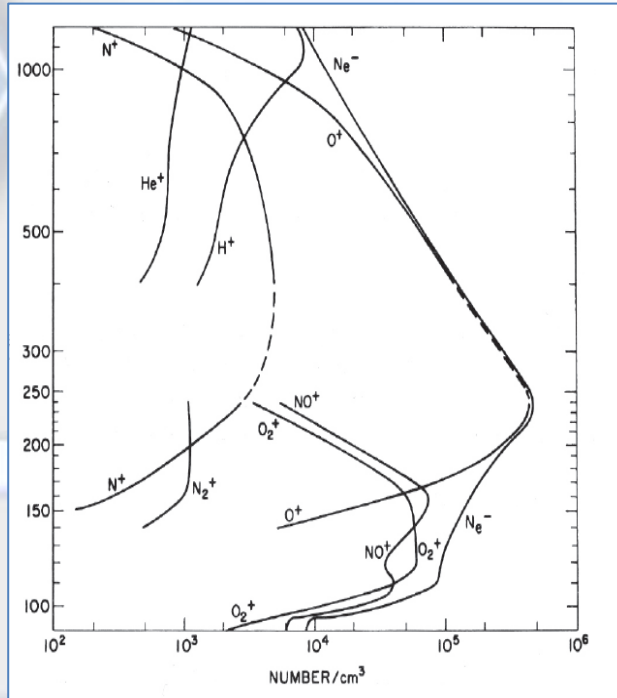
Struttura e composizione e dell'atmosfera terrestre

Vediamo adesso nel dettaglio quale è la struttura dell'atmosfera terrestre ed in particolare della zona compresa tra 80Km e 500Km di altezza, zona denominata «Termosfera» ma che nell'ambito delle radiocomunicazioni ha poi, preso il nome di «Ionosfera» e di come questa interviene nella propagazione delle onde EM a grande distanza.



La propagazione delle Onde Radio

Composizione e Struttura della ionosfera

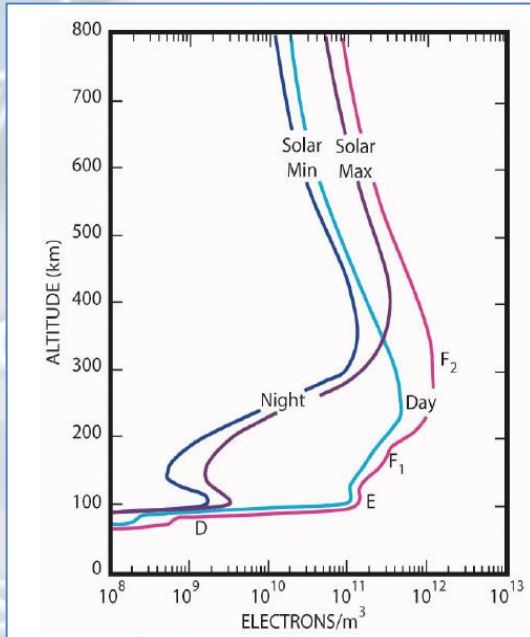


La zona dell'atmosfera terrestre di altezza compresa tra un minimo di 80 km e un massimo di oltre 500 km, denominata termosfera o **ionosfera** si caratterizza da una particolare stratificazione dei gas che la compongono e che si presentano in forma ionica (**plasma ionosferico**), ovvero le relative molecole/atomi non risultano elettricamente neutre ma presentano una carica elettrica positiva dovuta alla perdita di elettroni a causa delle sollecitazioni dovute alla presenza della fortissima radiazione UV prodotta dai raggi solari e di altre radiazioni cosmiche, conseguentemente si registra una analoga presenza di elettroni liberi.

La propagazione delle Onde Radio

Composizione e Struttura della ionosfera

La presenza nella ionosfera, ad altezze comprese tra 80 e 400 Km, di strati a diverso livello di ionizzazione è quindi la condizione che permette alle onde radio di essere “deviate”, analogamente a quanto avviene per un fascio di luce che attraversi materiali a diversa densità (Legge di Snell)



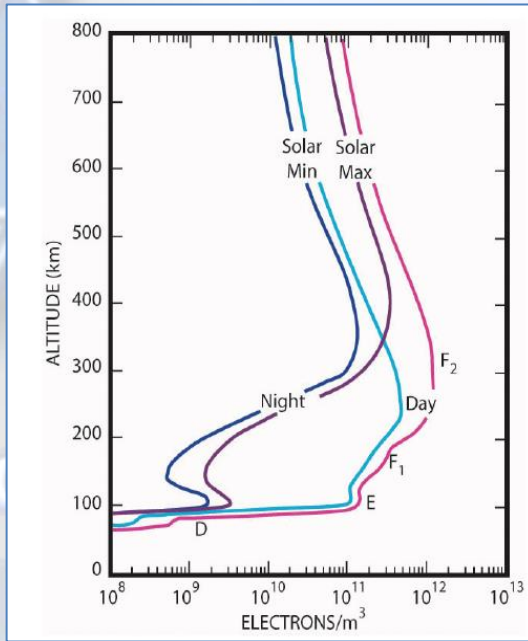
Strato D - è il più basso ed è presente in una zona della ionosfera compresa tra i 60 e 90 km di altezza, il livello di ionizzazione varia rapidamente nell'arco della giornata e di norma lo strato D è presente solo di giorno.

Strato E - presente in una zona compresa tra i 100 e i 140 Km di altezza, noto anche con il nome di “Kennelly-Heaviside Layer” il livello di ionizzazione dello strato è legato alla radiazione solare diurna e di conseguenza varia significativamente nell'arco della giornata

Strato F - occupa una vasta zona compresa tra i 150 e i 400 Km di altezza, noto anche con il nome di “Appleton-Barnett Layer” presenta il più alto livello di ionizzazione di tutta la ionosfera, è sempre presente anche di notte e ha la particolarità che durante il giorno la concentrazione delle cariche si distribuisce su due distinti livelli sovrapposti denominati “F1” e “F2”

La propagazione delle Onde Radio

Composizione e Struttura della ionosfera



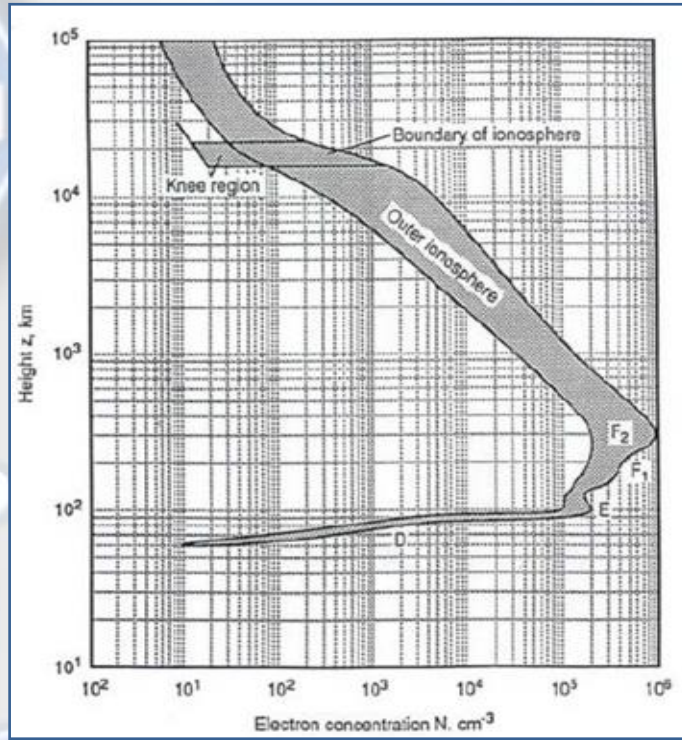
A differenza degli strati E ed F lo **strato D** non è di alcuna utilità per la propagazione delle onde elettromagnetiche a causa del livello di ionizzazione troppo basso e, sulla parte bassa delle HF, il suo effetto è addirittura dannoso in quanto è causa di attenuazione per assorbimento.

Lo strato E ma soprattutto lo strato F sono invece in grado di deviare il percorso delle onde elettromagnetiche che li attraversano fino al punto di causarne la riflessione verso terra in funzione dell'angolo di incidenza con cui il fascio raggiunge lo strato ionizzato

Come vedremo meglio più avanti si definisce «**Frequenza Critica**» (f_o) dello strato la massima frequenza che permette la riflessione per qualsiasi angolo di incidenza (riflessione totale)

La propagazione delle Onde Radio

Composizione e Struttura della ionosfera



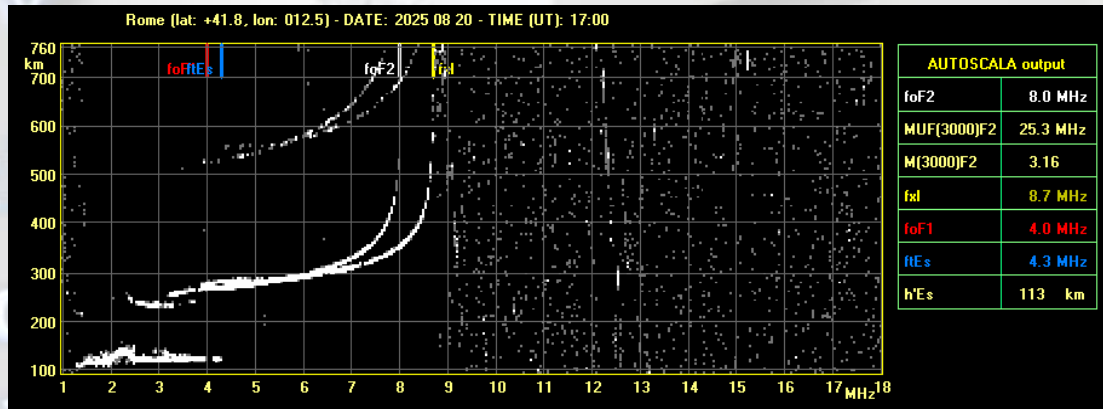
La ionosfera terrestre si presenta quindi come un plasma con valori di N_e (densità elettronica) **stratificati e variabili in funzione dell'altezza**. Il livello di densità elettronica (ionizzazione) varia in relazione al ciclo solare e il valore massimo di N_e si raggiunge di giorno intorno ai 350Km di altezza (Strato F2). Le cariche elettriche libere fanno sì che il plasma sia un **buon conduttore di elettricità, e che risponda fortemente ai campi elettromagnetici**.

La fisica del plasma ionosferico ci dice che la «**Frequenza di Plasma**» f_0 è la frequenza del moto armonico con cui gli elettroni si muovono all'interno del plasma e dipende dalla densità di cariche libere presenti

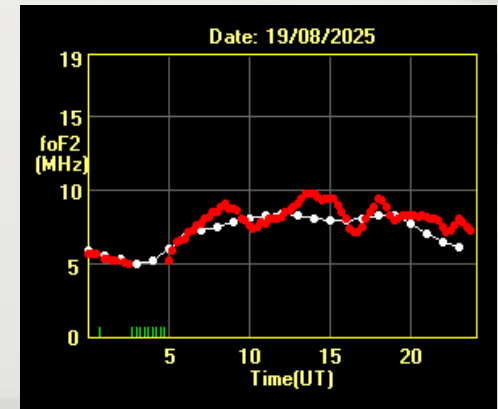
La propagazione delle Onde Radio

Composizione e Struttura della ionosfera

Il valore della **Frequenza critica (f_o)** del plasma ionosferico non è costante ma varia durante il giorno in base all'orario, i valori minimi e massimi che può assumere dipendono dal ciclo solare e di norma sono compresi tra **2Mhz** (di notte al minimo del ciclo solare) e **12Mhz** (di giorno durante il massimo del ciclo solare). Il valore di f_o è monitorato costantemente dalla rete mondiale degli istituti di geofisica attraverso le «**ionosonde**».



<http://ionos.ingv.it/Roma/latest.html>



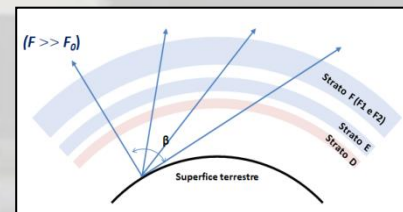
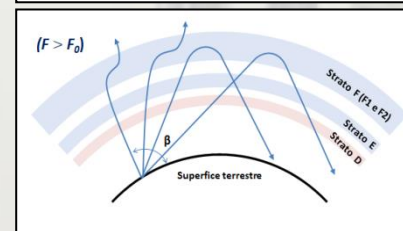
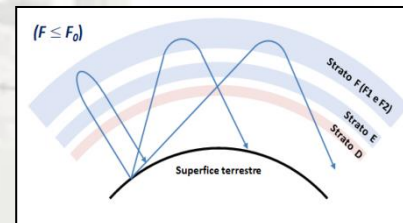
La propagazione delle Onde Radio

Composizione e Struttura della ionosfera

La frequenza di plasma detta anche «**Frequenza Critica**» F_0 definisce il limite oltre il quale il comportamento del plasma ionosferico nei confronti di un campo EM si modifica.

In particolare possiamo identificare 3 diverse condizioni:

1. La frequenza F del fascio EM che raggiunge la ionosfera è minore della frequenza critica ($F \leq F_0$). In questo caso il plasma si comporta come un «**buon conduttore**» causando sempre la **riflessione totale del fascio**
2. La frequenza F del fascio EM che raggiunge la ionosfera è maggiore della frequenza critica ($F > F_0$). In questo secondo caso il plasma si comporta come un «**mezzo a indice di rifrazione variabile in funzione della frequenza**» causando la **deviazione del fascio che l'attraversa** in funzione del valore assunto dall'indice di rifrazione ($\eta < 1$)
3. La frequenza F del fascio EM che raggiunge la ionosfera è molto maggiore della frequenza critica ($F \gg F_0$). In questo ultimo caso il plasma è «**totalmente trasparente**» al fascio EM che **non subisce variazioni** ($\eta = 1$)

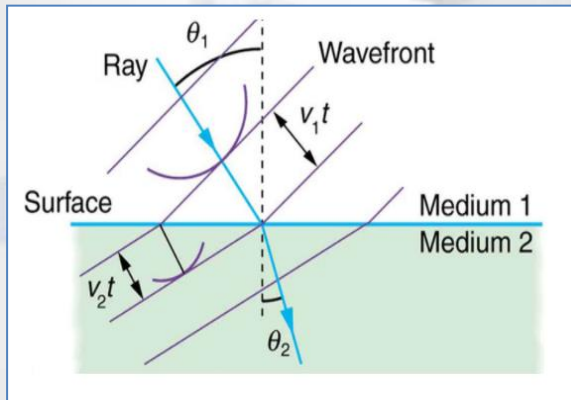


La propagazione delle Onde Radio

Composizione e Struttura della ionosfera

Concentriamo adesso la nostra attenzione sul **caso 2** in cui la **frequenza f del fascio EM che raggiunge la ionosfera è maggiore della frequenza critica ($F > F_0$)**

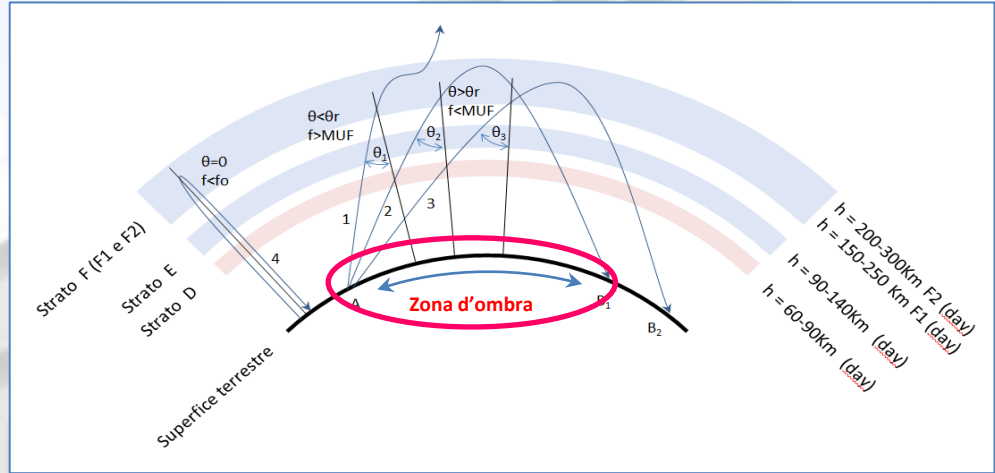
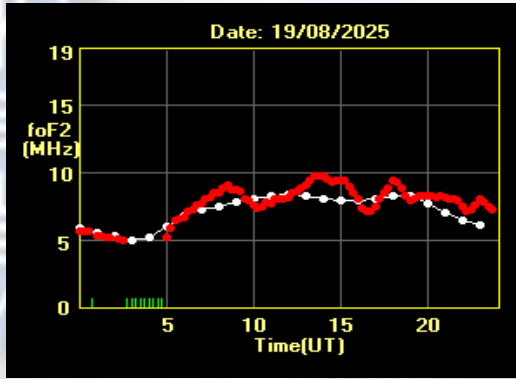
Abbiamo visto che in questo caso il plasma si comporta come un mezzo a indice di rifrazione variabile causando la deviazione del fascio in funzione del valore assunto dall'indice di rifrazione con le stesse regole dell'ottica geometrica descritte dalla legge di Snell:



Analogamente ad un fascio di luce, l'onda EM che attraversa mezzi con diverso indice di rifrazione subisce una deviazione a causa della diversa velocità con cui l'onda stessa si propaga in tali mezzi

La direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica che attraversa gli strati a diversa densità di ionizzazione **subisce quindi una deviazione la cui entità è funzione della frequenza e della diversa densità di ionizzazione dello strato che attraversa.**

Frequenza Critica - MUF



Appare evidente, sulla base di quanto abbiamo appena visto, che per frequenze maggiori di f_0 la riflessione avviene solo per angoli di incidenza maggiori di un certo valore (θ_c Angolo Critico) valore angolare che cresce all'aumentare della frequenza, i fasci di onde elettromagnetiche con frequenza superiore alla frequenza critica ($f > f_0$) e che raggiungono la ionosfera con angoli minori di tale angolo «bucano» lo strato e non vengono deviati verso terra, ne consegue che per tali frequenze si potranno determinare «Zone d'ombra» in cui il segnale radio non potrà essere ricevuto.

La propagazione delle Onde Radio

Frequenza Critica – MUF LUF e FOT

Sulla base di quanto appena visto possiamo quindi affermare che in funzione dei livelli di ionizzazione dello strato riflettente esiste una frequenza massima oltre la quale la riflessione non è più possibile indipendentemente dall'angolo di incidenza.

*Si definisce **MUF (Maximum Usable Frequency)** la massima frequenza utilizzabile che permette la riflessione del fascio radio. Il valore della MUF è mediamente circa il triplo di f_0 ($MUF = 3 * f_0$)*

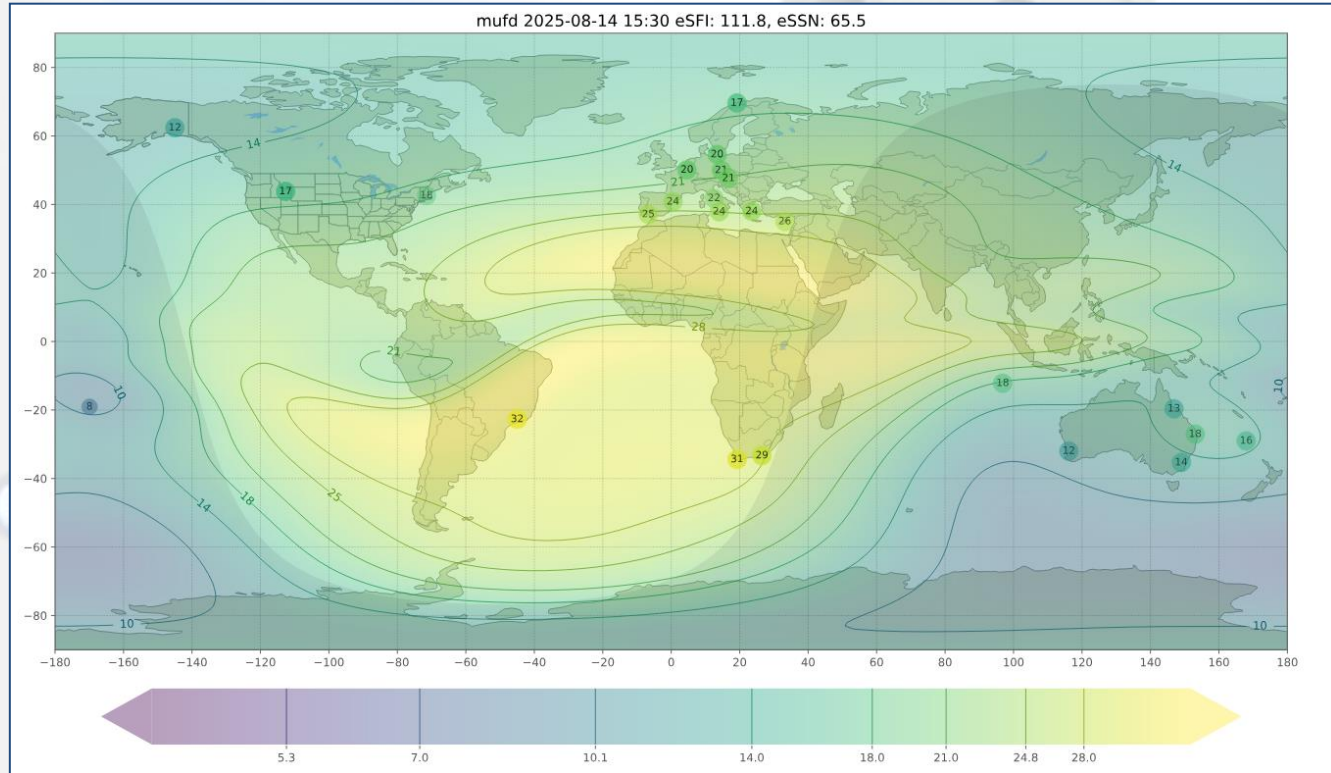
*Analogamente esiste un valore **LUF (Lower Usable Frequency)** che ci indica la minima frequenza utilizzabile al di sotto della quale i fenomeni di attenuazione e di assorbimento sono tali da rendere impossibile il collegamento radio.*

*Poiché in entrambi i casi si tratta di valori limite è stato definito un ulteriore parametro **FOT (Frequency of Optimum Traffic)** che ci indica il valore ottimale di frequenza da utilizzare per una determinata destinazione.*

Questo valore è mediamente compreso tra 80% e 90% della MUF

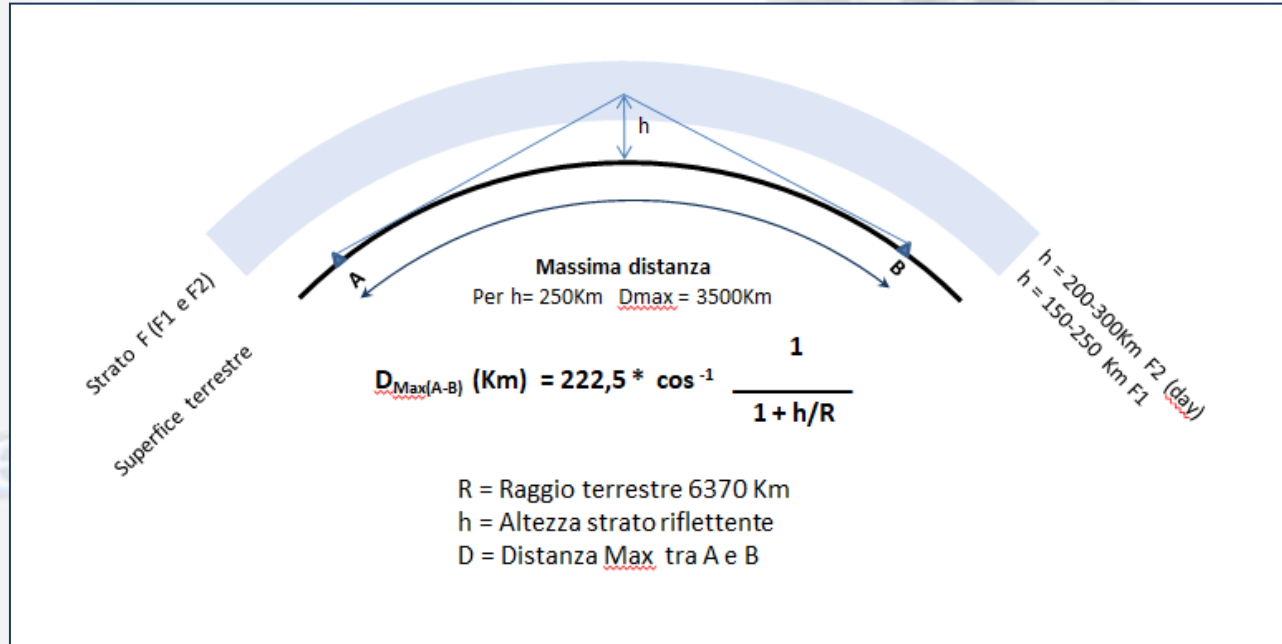
La propagazione delle Onde Radio

Mapa della MUF



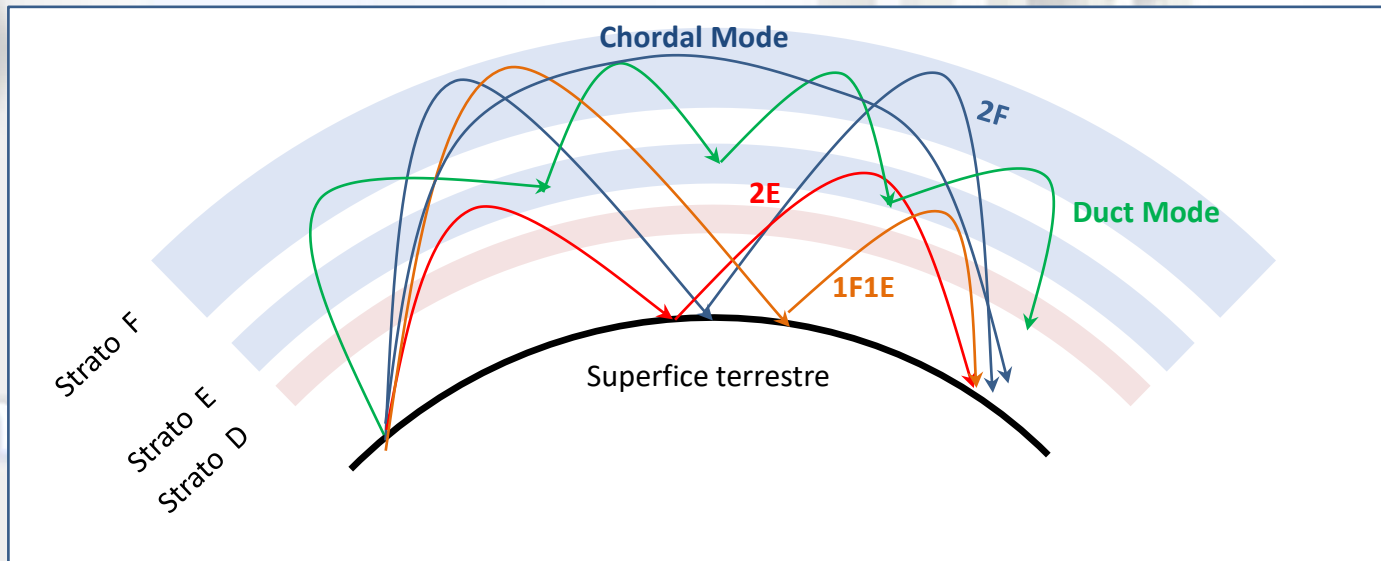
La propagazione delle Onde Radio

Massima distanza con singola riflessione



La propagazione delle Onde Radio - Multihop path

*E' opportuno evidenziare come Il percorso via riflessione ionosferica può realizzarsi in diverse modalità e condizioni **anche attraverso riflessioni e rifrazioni multiple** che possono interessare strati diversi della ionosfera. Vediamo alcuni esempi:*



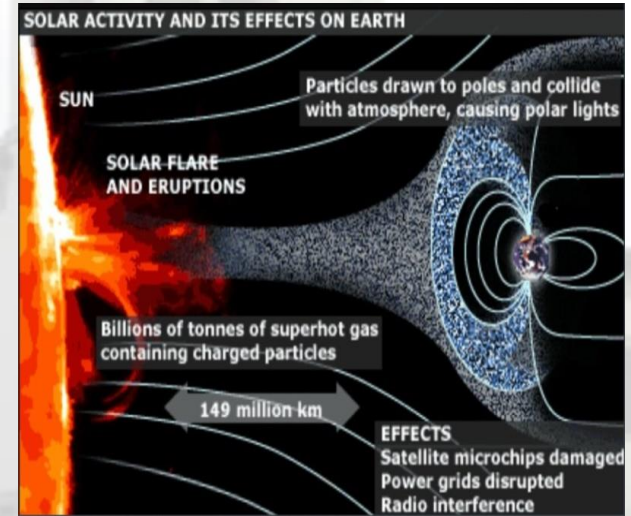
Le modalità Duct e Chordal è più probabile che si presentino alle latitudini equatoriali (TEP o anomalia equatoriale) o lungo la "gray line" (zona di confine tra giorno e notte) e permettono generalmente di avere una minore attenuazione in quanto il segnale radio non attraversa ripetutamente gli strati D ed E come avviene nelle riflessioni multiple a terra.

La propagazione delle Onde Radio

Il ciclo solare

Come accennato all'inizio il livello di ionizzazione degli strati riflettenti della ionosfera **dipende direttamente dal livello dell'attività solare** che a sua volta è legato alla presenza delle «**macchie solari**» oltre ad altri fenomeni classificati come SID (Sudden ionospheric disturbance) eventi improvvisi che possono essere anche indipendenti dal ciclo solare quali Brillamenti Solari (Flares), Buchi Coronal (Coronal Holes), Eruzioni solari nella cromosfera (CME).

Vediamo adesso la relazione esistente tra l'attività solare e il comportamento della ionosfera in relazione alle condizioni di propagazione.



La propagazione delle Onde Radio

Il ciclo solare

Esistono quattro cicli nel sistema solare che influenzano i livelli di ionizzazione della ionosfera terrestre

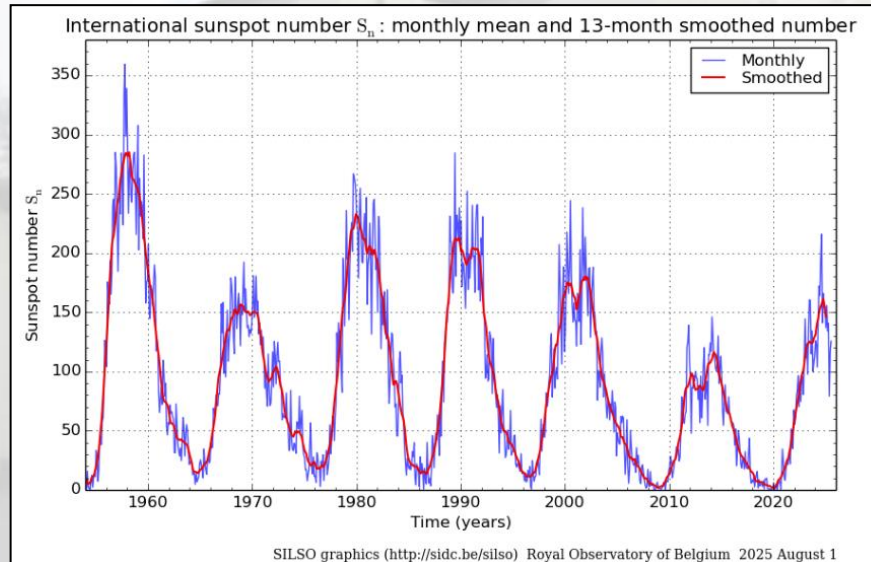
- *Ciclo undecennale dell'attività solare (Sunspot cycle)*
- *Ciclo di rotazione solare sul proprio asse (27 giorni)*
- *Ciclo orbitale terrestre (percorso orbitale della terra intorno al sole)*
- *Ciclo di rotazione terrestre sul proprio asse (alternanza giorno notte)*

Vediamo adesso nel dettaglio come ciascuno di essi ha influenza sulla ionizzazione e quindi sulla propagazione dei segnali radio.

La propagazione delle Onde Radio

Il ciclo solare undecennale

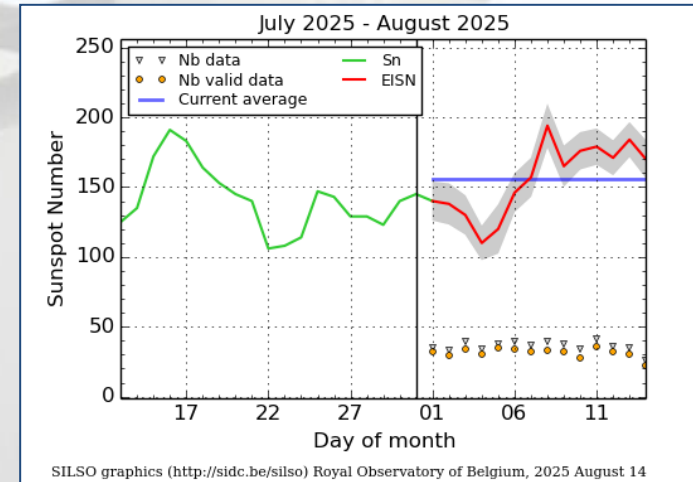
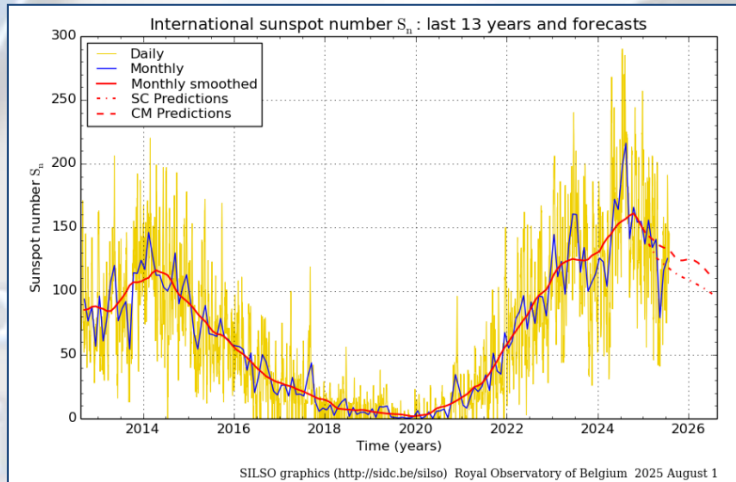
*Esiste una relazione diretta tra il numero di macchie solari (SSN) presenti sulla superficie solare (fotosfera) e il livello delle radiazioni ionizzanti che raggiungono la ionosfera terrestre. La presenza delle macchie solari ha un **andamento ciclico undecennale** e varia dall'assenza totale ad un massimo che può raggiungere un valore di SSN di oltre 200-300*



La propagazione delle Onde Radio

Il ciclo solare

Andamento del 25° Ciclo iniziato nel 2020

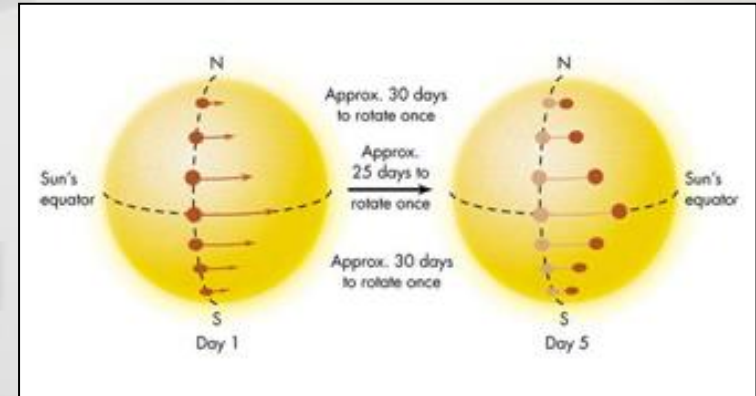


La propagazione delle Onde Radio

Ciclo di rotazione solare sul proprio asse (27 giorni)

Il Sole come ogni altra stella è costituita da plasma e quindi non ha un moto di rotazione uniforme ma la sua velocità è maggiore all'equatore e minore ai poli. Il periodo di rotazione medio del sole è di circa 25,4 giorni (periodo sidereo) ma un eventuale punto fisso sulla superficie del sole, osservato dalla terra, appare nella stessa posizione dopo circa 27 giorni (periodo sinodico) a causa del movimento di rivoluzione terrestre che sposta il punto di osservazione lungo l'orbita terrestre.

Poiché come abbiamo visto la presenza delle macchie solari influenza significativamente il comportamento della ionosfera dobbiamo tenere conto che anche nei periodi di elevata presenza di macchie le stesse possono non essere uniformemente distribuite sulla superficie solare e quindi vi potrà essere una fluttuazione nei livelli di ionizzazione dovuta al fatto che il numero di macchie presenti sulla superficie solare esposta verso la terra può variare significativamente con un periodo di 27 giorni.

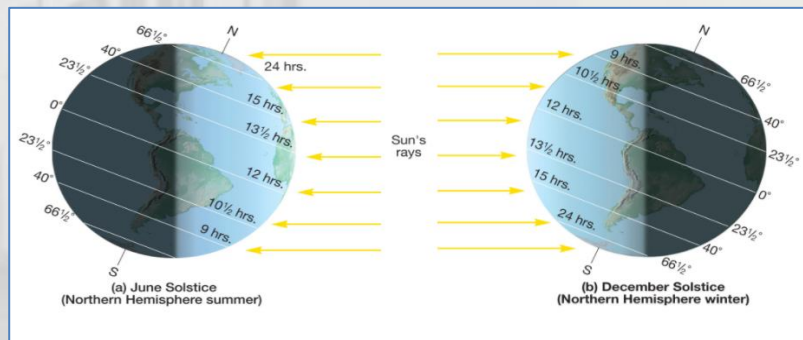


La propagazione delle Onde Radio

Ciclo orbitale terrestre (Rivoluzione)

A causa dell'inclinazione dell'asse terrestre rispetto al piano orbitale (eclittica), la terra è raggiunta dai raggi solari con inclinazione variabile (declinazione solare), ciò è causa dell'alternanza delle stagioni e del variare del rapporto giornaliero tra la durata del giorno e della notte effetto che peraltro è più evidente alle alte latitudini

Come abbiamo visto la radiazione solare, ed in particolare le componenti di radiazione UV e X sono le principali responsabili della ionizzazione, poiché l'intensità della radiazione che raggiunge la ionosfera, ed in particolare gli starti più bassi, sarà proporzionale all'angolo con cui tali radiazioni la raggiungono, nonché dalla durata dell'esposizione, il livello di ionizzazione varierà anche in funzione del ciclo stagionale.





Sezion
di
Pisa

La propagazione delle Onde Radio

Ciclo di rotazione terrestre sul proprio asse (alternanza giorno notte)

L'alternanza giorno notte determina due variazioni nel comportamento della ionosfera.

La prima interessa gli strati bassi D ed E dove la velocità di ricombinazione è tale, soprattutto per lo strato D, da far sì che lo strato scompaia contestualmente al tramonto per ricomparire all'alba successiva, il processo è analogo anche per lo strato E anche se avviene con tempi più lunghi che fanno sì che il decadimento del livello di ionizzazione dello strato E non sia immediato come per lo strato D ma sia più graduale.

La seconda variazione riguarda invece lo strato F ed in particolare la suddivisione diurna dello strato F nei due sottostrati F1 e F2 che durante la notte si ricompongono in un unico strato con un livello di ionizzazione comunque più basso rispetto alle ore diurne

La propagazione delle Onde Radio

Ciclo di rotazione terrestre sul proprio asse (alternanza giorno notte)

*Gli effetti sulla propagazione di queste variazioni sono abbastanza noti ed in particolare sono più evidenti nei periodi di scarsa attività solare dove i livelli di ionizzazione più bassi fanno sì che **le bande alte (sopra i 40 m) siano “aperte” solo nelle ore centrali del giorno** mentre di notte generalmente la MUF scende sotto i 10 MHz rendendole di fatto inutilizzabili.*

Nei periodi invece di massima attività solare le bande alte possono rimanere aperte anche di notte e poter avere buoni segnali soprattutto nelle prime ore dopo il tramonto (Gray Line) quando, diminuita l'attenuazione dovuta agli strati più bassi, i livelli di ionizzazione dello strato F sono ancora molto elevati, si può notare infatti come generalmente i valori di MUF si mantengono elevati per alcune ore anche dopo il tramonto.



Sezione
di
Pisa

***Grazie
per l'attenzione***

