

Aspettando il 25° Ciclo Solare (parte seconda)



by i5WHC
i5-whc@libero.it

Visto l'interesse all'argomento che alcuni amici della Sezione mi hanno manifestato raccolgo l'invito ad un approfondimento su quanto scritto nel precedente articolo integrandolo con questa seconda parte.

Nelle ultime righe del testo precedente avevo fatto riferimento ad un articolo pubblicato sul sito del ARRL in cui si trattava della comparsa di alcune macchie solari, alla fine del mese di dicembre 2019, dopo un periodo abbastanza lungo di assenza totale, e di come questo fosse stato interpretato da una parte della comunità scientifica come il segnale del possibile inizio del 25° ciclo, tesi peraltro avvalorata dal fatto che la coppia di nuove macchie osservate presentavano polarità magnetica opposta rispetto alle precedenti, condizione che in base alla seconda legge di Hale^[1] potrebbe essere appunto l'indicatore dell'inizio del nuovo ciclo.

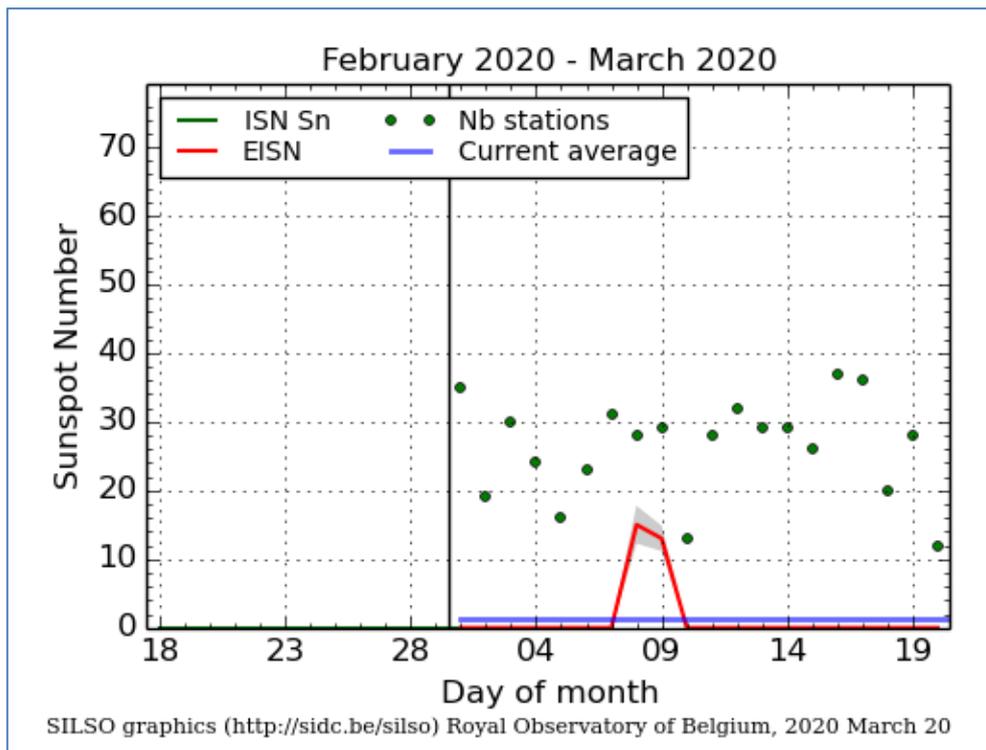


Fig.1

[1] Nel 1908 **George Ellery Hale** un astronomo statunitense scoprì i campi magnetici e la polarità nelle macchie solari. Questo studio lo portò ad enunciare delle leggi che presero appunto il nome di leggi di Hale. La prima spiega che, in un sistema bipolare di macchie, quella che precede ha polarità opposta a quella che segue, e inoltre che questa polarità è invertita nell'emisfero Nord rispetto a quello Sud. La seconda legge di Hale ci dice che la polarità delle macchie si inverte nei cicli successivi. Per meglio spiegare, se nel 24° ciclo abbiamo la macchia che precede con polarità negativa nell'emisfero Nord sarà positiva in quello a Sud, nel 25° ciclo avremo la macchia che precede con polarità positiva a Nord e negativa a Sud.

Anche se è ancora troppo presto per dirlo con certezza, purtroppo sembra che non sia così, infatti dopo la timida comparsa delle macchie a fine dicembre 2019 si è avuto un ulteriore periodo prolungato di assenza totale interrotto solo dalla saltuaria comparsa di alcune altre ma che, come vedremo successivamente, non sono significative per il calcolo del parametro di riferimento SSN (Solar Spot Number) parametro che non rappresenta il numero fisico delle singole macchie ma che per convenzione è il risultato di una calcolo ponderato (linea azzurra del grafico di figura 1) il cui risultato risulta appunto essere costantemente pari a zero.

La prolungata assenza di macchie solari, tuttora in corso, sta facendo avvicinare il periodo di transizione dal 24° ciclo al 25° al record del più lungo periodo di assenza di macchie che spetta al 12° ciclo (1873-1884) che totalizzo un numero di giorni senza macchie (Spotless day) pari a 1028 nell'intero ciclo. Ad oggi il 24° ciclo che si sta chiudendo ha già totalizzato ben 604 giorni senza macchie a fine 2019, ma si sommano quelli dei primi mesi di quest'anno arriviamo superare i 700.

E' in linea con questa tendenza negativa anche il numero molto elevato dei giorni senza macchie registrati in un singolo anno, sono stati registrati infatti 208 giorni senza macchie nel 2018 e ben 273 nel 2019 dato, quest'ultimo, non troppo lontano dal massimo numero di giorni senza macchie registrato in un solo anno che spetta al 1913 con 311 giorni di assenza, dato che posiziona il 2019 al 4° posto della classifica degli anni peggiori (fig.2).

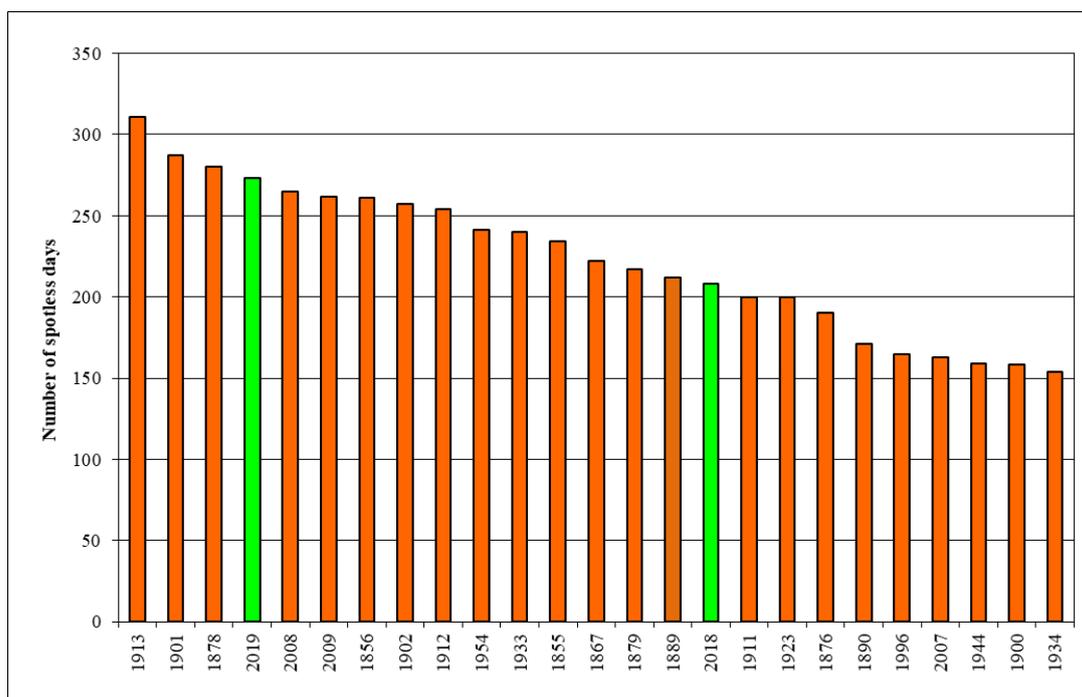


Fig.2 - Top 25 of years with most number of spotless days since 1849

Tutti questi segnali portano a far ritenere che la transizione tra il vecchio e il nuovo ciclo possa non essere così rapida, come peraltro già accaduto per la transizione tra il 23° e il 24° ciclo definita "anomala" [2] anche se la comunità scientifica è concorde ad affermare che, su base statistica, non vi sia una correlazione stretta tra questi parametri e i tempi, ma soprattutto l'ampiezza (max SSN) con cui si presenterà il prossimo ciclo.

[2] Luigi Perna – "Ionospheric plasma response to the anomalous minimum of the solar cycle 23/24: modeling and comparison with IRI-2012" – 2017 - Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Dottorato di ricerca in Geofisica

Se qualcuno fosse interessato ad approfondire l'argomento consiglio la consultazione della seguente pagina web: <http://www.sidc.be/silso/datafiles> gestita dal Solar Influences Data analysis Center (SIDC) dipartimento del Royal Observatory of Belgium da cui sono tratti tutti i dati sopra riportati.

Fatta questa doverosa introduzione veniamo però a quello che è l'obiettivo di questo articolo cioè un approfondimento sui principali parametri che caratterizzano l'attività solare ed in particolare la loro interpretazione nell'ottica di nostro interesse ovvero come questi parametri influenzino, e di conseguenza ci permettano entro certi limiti di prevedere le condizioni di propagazione nelle bande HF.

Per far questo credo sia utile un richiamo sui concetti base che regolano la propagazione ionosferica dei segnali radio (Skywave propagation).

Skywave propagation

Ognuno di noi sa bene come sia possibile raggiungere con un segnale radio ogni parte del globo utilizzando lo spettro delle HF e come ciò sia reso possibile da un processo che è comunemente noto con il nome di "propagazione ionosferica".

Siamo oramai così talmente abituati alla presenza di questo "fenomeno" che spesso non ci soffermiamo a considerare come questo sia il risultato di un insieme di particolarissime condizioni specifiche del pianeta su cui viviamo e che peraltro sono, per certi aspetti, le stesse che sulla base di un delicatissimo equilibrio hanno permesso che molti milioni di anni fa sulla Terra avesse origine la vita.

E' comunemente noto come il nostro pianeta per la sua posizione nel sistema solare e per le caratteristiche geofisiche del pianeta stesso, prima tra tutte la presenza e composizione chimica della sua atmosfera (fig.3), ha fatto sì che si creassero le condizioni per la nascita e lo sviluppo di tutte le forme di vita a noi note, probabilmente dovremmo tutti considerare con più attenzione questo aspetto e soprattutto la delicatezza di un equilibrio così complicato.

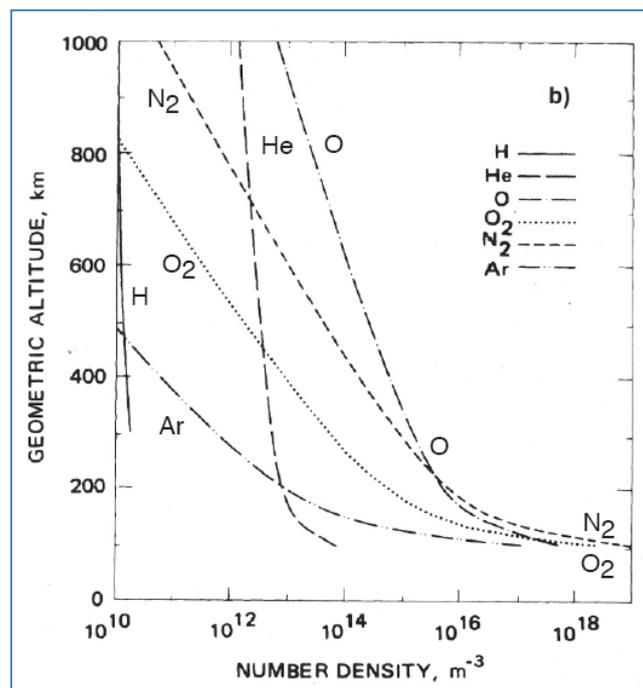


Fig. 3 – Composizione chimica dell'atmosfera terrestre alle varie altezze

Una di queste caratteristiche appunto, la presenza di un'atmosfera, la sua composizione, e l'interazione di alcuni sue parti con la radiazione solare, sono gli elementi che hanno anche permesso non molto tempo fa di scoprire che le onde elettromagnetiche emesse in un particolare e ristretto range di frequenze (MF-HF) potessero essere deviate dal loro percorso rettilineo e, attraverso una serie di meccanismi assai complessi, potessero raggiungere tutte le parti del globo. Se non vi fossero queste particolari condizioni questo non sarebbe stato possibile.

La scoperta di questa caratteristica della nostra atmosfera è avvenuta quasi per caso, come spesso è avvenuto per le più importanti scoperte scientifiche, lo studio di questi fenomeni è abbastanza recente, basta ricordare che i primi a formulare l'ipotesi scientifica circa il coinvolgimento della ionosfera nella propagazione delle onde radio sono stati gli scienziati Oliver Heaviside (UK) e Arthur Edwin Kennelly (USA) nel 1902^[3] sulla base dell'esperienza del collegamento transoceanico effettuata da Guglielmo Marconi l'anno precedente. Solo successivamente però, nel 1925 fu dimostrata la presenza di strati riflettenti nella ionosfera da Edward Appleton a cui fu per questo assegnato il Nobel per la fisica e solo nel 1929 fu introdotto da Robert Watson Watt, padre del radar, il concetto di "ionosfera" e della presenza di singoli zone (strati) con differente livello di ionizzazione.

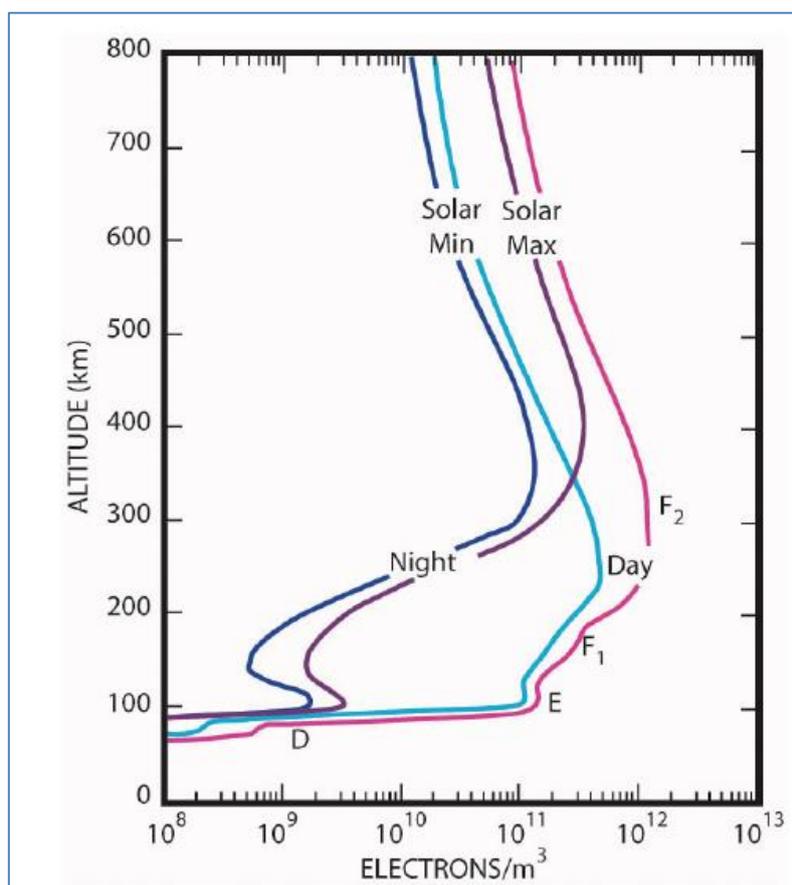


Fig.4 – Andamento del livello di ionizzazione degli strati riflettenti

La presenza nella ionosfera, ad altezze comprese tra 80 e 400 Km, di strati a diverso livello di ionizzazione è 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 .

[3] "The Kennelly-Heaviside Layer", 25 Maggio 1925 Science, 61, No 1586, pp. 540

Rifrazione e Riflessione - La legge di Snell

Leggi fisiche dell'ottica geometrica ci dicono che un raggio luminoso, che altro non è che una radiazione elettromagnetica a frequenza molto elevata ($400\text{nm} < \lambda < 780\text{nm}$), che attraversa la superficie di contatto (interfaccia) tra due mezzi fisici con diversa densità, e quindi diverso indice di rifrazione "n", subisce una deviazione proporzionale al rapporto tra gli indici di rifrazione n_1 e n_2 dei due mezzi attraversati secondo la relazione che in fisica prende il nome di **legge di Snell**:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Dove θ_1 e θ_2 rappresentano gli angoli di incidenza rispetto alla verticale, del raggio incidente e del raggio rifratto. Dalla formula di cui sopra si deduce che se il raggio incidente passa da un mezzo con indice di rifrazione n_1 minore ad un mezzo con indice di rifrazione n_2 maggiore ovvero $\frac{n_2}{n_1} > 1$ l'angolo θ_2 del raggio rifratto sarà minore dell'angolo θ_1 del raggio incidente ovvero il raggio sarà deviato verso l'alto mentre se il raggio incidente passa da un mezzo con indice di rifrazione n_1 maggiore ad un mezzo con indice di rifrazione n_2 minore ovvero $\frac{n_2}{n_1} < 1$ avverrà il contrario cioè l'angolo θ_2 del raggio rifratto sarà maggiore dell'angolo θ_1 del raggio incidente ovvero il raggio sarà deviato verso il basso (è il caso rappresentato in figura 5)

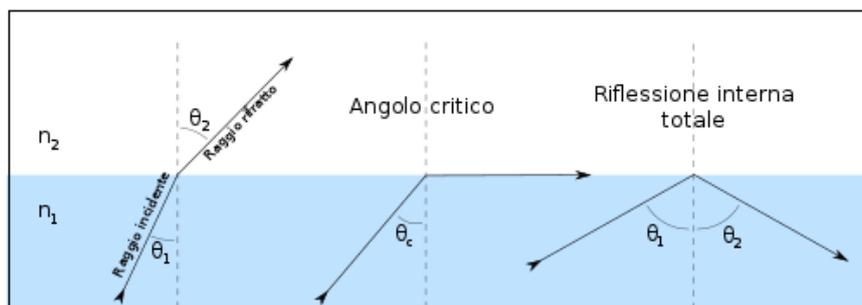


Fig. 5 – Legge di Snell - variazione dell'angolo di incidenza per $\frac{n_2}{n_1} < 1$

In questo secondo caso però esiste una condizione limite che si determina quando il valore di θ_1 diventa maggiore di θ_c ovvero quando si verifica la seguente condizione:

$$\sin^{-1} \theta_1 > \frac{n_2}{n_1}$$

In questo caso la legge di Snell non è più applicabile in quanto non si ha più rifrazione ma si ha invece riflessione interna totale, ovvero il raggio non attraversa la superficie di contatto ma viene riflesso indietro all'interno del mezzo attraversato con un angolo di riflessione θ_2 che è sempre uguale all'angolo incidente θ_1 , il valore **dell'angolo critico** θ_c oltre il quale si ha il passaggio dalla condizione di rifrazione a quella di riflessione interna totale è dato dalla seguente relazione :

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

Teniamo ben presente quanto sopra esposto perché ritroveremo una analoga situazione quando andremo ad analizzare il comportamento di un segnale radio che attraversa i vari strati della ionosfera.

Composizione della ionosfera – strati ionizzati

Come già esposto più sopra la zona dell'atmosfera terrestre di altezza compresa tra un minimo di 60 km e un massimo di oltre 800 km è denominata ionosfera e si caratterizza da una particolare stratificazione dei gas che la compongono e che si presentano in forma ionica, ovvero le relative molecole/atomi non risultano elettricamente neutre ma presentano una carica elettrica dovuta alla perdita o all'acquisizione di elettroni a causa delle sollecitazioni dovute alla presenza di una forte radiazione UV prodotta dai raggi solari e da altre radiazioni cosmiche

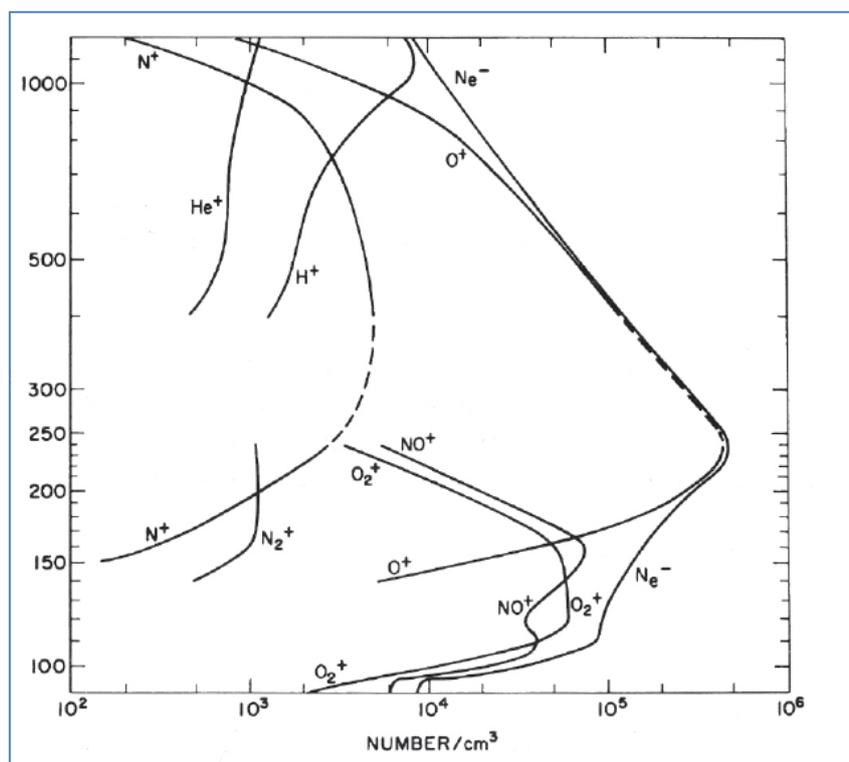


Fig.6 - Distribuzione ionica diurna della ionosfera

In figura 6 è rappresentata graficamente la distribuzione ionica diurna della ionosfera alle differenti altezze.

La distribuzione e di conseguenza la densità delle cariche presenti nella ionosfera non è uniforme ma si presenta in modo stratificato a differenti altezze con zone in cui la densità e la tipologia di cariche presenti varia in modo anche molto importante andando a costituire di fatto strati a diversa densità di ionizzazione.

Inoltre le caratteristiche dei vari strati non sono costanti ma variano in funzione della presenza della radiazione solare (giorno/notte) e dell'intensità delle radiazioni stesse (attività solare).

Lo studio della ionosfera ha portato ad identificare tre principali strati ionizzati con differenti caratteristiche che sono collocati a differenti altezze e che hanno comportamenti diversi nei confronti della propagazione delle onde elettromagnetiche.

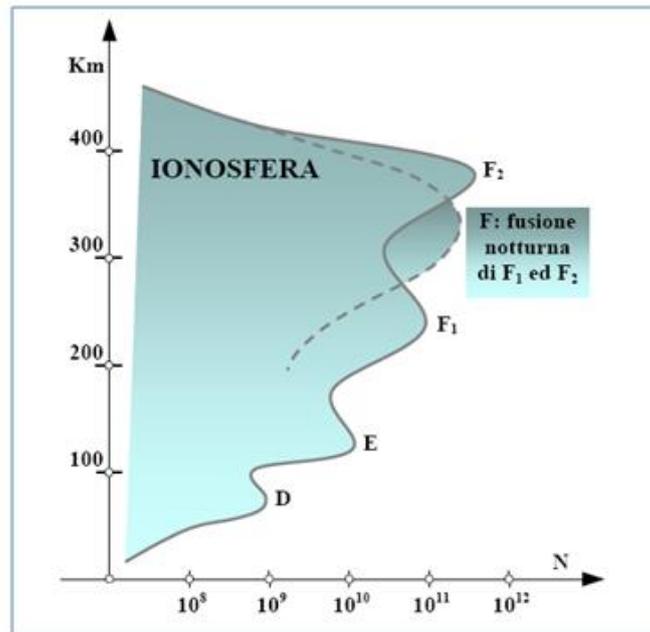


Fig.7 – Densità elettronica degli strati

Strato D

Lo strato denominato “strato D” è il più basso ed è presente in una zona della ionosfera compresa tra i 60 e 90 km di altezza, la pressione atmosferica è di circa 2Pa, la temperatura si aggira intorno ai -75°C e ha una densità elettronica abbastanza bassa (10^8 – 10^{10} e/m³) il livello di ionizzazione dello strato D varia rapidamente nell’arco della giornata ed è presente solo di giorno.

E’ composto prevalentemente da molecole di ozono O₃ e di monossido di azoto NO ed a causa della relativa alta densità dell’aria a questa altezza, dovuta alla elevata presenza di gas allo stato molecolare non dissociato, la ricombinazione ionica è molto veloce ed è per questo motivo che il livello di ionizzazione si mantiene abbastanza basso. Questo causa per contro un elevato effetto di assorbimento delle onde elettromagnetiche in conseguenza delle frequenti collisioni, effetto che è inversamente proporzionale alla frequenza del segnale radio e che aumenta sensibilmente al limite inferiore della banda HF (80m e 160 m) al punto di render le bande basse praticamente inutilizzabili in orario diurno specialmente nei periodi di elevata attività solare o in presenza di una forte esposizione ai raggi X come avviene in occasione di flares o di CME. Come già detto lo strato D scompare rapidamente dopo il tramonto ed alle alte latitudini alcune volte, in prossimità del solstizio invernale, non è presente neppure di giorno. L’effetto dello strato D sulle comunicazioni è solamente negativo in quanto a causa del basso livello di ionizzazione non è in grado di riflettere i segnali radio ma solo di causarne l’assorbimento per l’elevata frequenza delle collisioni.

Strato E

Poco al disopra dello strato D troviamo lo strato E che è presente in una zona compresa tra i 100 e i 140 Km di altezza, noto anche con il nome di “Kennelly-Heaviside Layer” presenta una pressione atmosferica di circa 0,01Pa, due ordini di grandezza inferiore allo strato D, e quindi i gas presenti sono molto più rarefatti. La temperatura si aggira intorno ai -50°C e ha una densità elettronica variabile (10^9 – 10^{11} e/m³) il livello di ionizzazione dello strato è legato alla radiazione solare diurna e di conseguenza varia nell’arco della giornata oltre che stagionalmente sulla base dell’angolo zenitale (declinazione) del sole.

E' composto prevalentemente da ioni molecolari di ossigeno O_2^+ e di azoto NO^+ e, a differenza dello strato D, la ricombinazione è molto più lenta a causa della maggiore rarefazione dei gas che lo compongono, questo comporta che la presenza dello strato E si protrae per diverse ore anche dopo il tramonto e nei periodi di maggiore attività solare non scompare totalmente neppure durante la notte.

Con maggiore frequenza intorno ai solstizi (estivo e invernale) si osservano a volte zone limitate (nubi) di gas molto sottili (0,2-2 Km) con livelli di ionizzazione molto più elevati della media ($>10^{12}$ e/m³) e che si manifestano per intervalli di tempo che vanno da alcune decine di minuti ad alcune ore. Per il loro elevato livello di ionizzazione sono in grado di causare la riflessione anche di segnali a frequenza molto elevata (fino alle VHF) questo fenomeno ancora non del tutto spiegato prende il nome di "E-sporadico".

Ancora contrariamente allo strato D, lo strato E, quando è presente, è in grado di riflettere i segnali nella parte bassa della gamma HF mentre viene attraversato da quelli a frequenza più alta sui quali però è causa di attenuazione, la frequenza limite di riflessione dipende dal livello di ionizzazione dello strato ed è quindi maggiore nelle ore centrali della giornata.

Strato F

Lo 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, la pressione atmosferica è di circa 0,0001Pa, estremamente bassa, a causa della rarefazione dei gas in forma molecolare presenti a questa altezza.

La temperatura sale rapidamente al di sopra dei 150km di altezza fino a raggiungere, all'estremo superiore, temperature dell'ordine di 1000°C (termosfera), ha una densità elettronica elevata (10^{12} – 10^{13} e/m³) il livello di ionizzazione dello strato dipende dal livello dell'attività solare (SSN e SFI) rimanendo presente costantemente sia di giorno che di notte in quanto, come già detto, la ricombinazione è estremamente lenta a causa della rarefazione, con la particolarità che durante il giorno la concentrazione delle cariche si distribuisce su due distinti livelli sovrapposti denominati "strato F1" ad un'altezza compresa tra 150 e 220 Km e "strato F2" ad un'altezza compresa tra 250 e 400 Km mentre durante la notte i due strati si fondono in un unico strato ad un'altezza intermedia compresa tra 150 e 300Km e con un livello di ionizzazione generalmente inferiore al livello massimo che si raggiunge nello strato F2 durante il giorno.

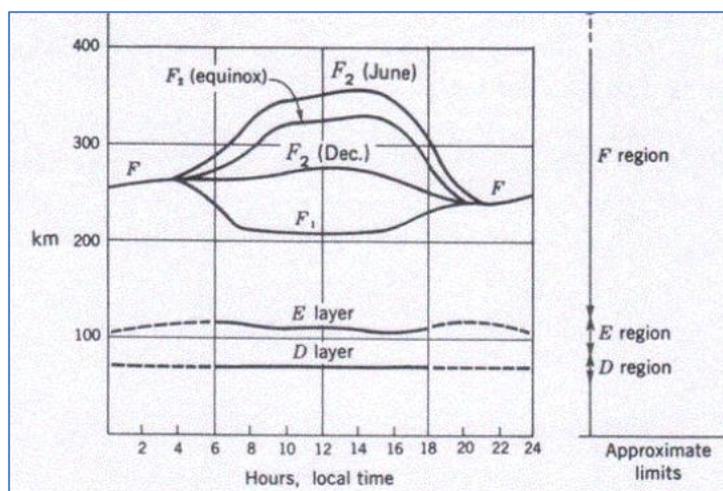


Fig.8 – Variazione giornaliera e stagionale dell'altezza degli strati

Lo strato F è composto principalmente ioni atomici O+, ma sono presenti anche ioni H+, He+, N+ . Come già detto lo strato F è sempre presente anche se l'altezza e il livello di ionizzazione varia significativamente su base giornaliera nonché in funzione dell'attività solare, delle stagioni e della latitudine (vedi figura 8) .

Lo strato F è il principale responsabile della propagazione dei segnali radio a lunga distanza e l'effetto riflettente è maggiormente efficiente nel periodo invernale, soprattutto per la parte alta dello spettro HF, quando la diversificazione diurna tra F1 e F2 è meno evidente.

Rifrazione e riflessione ionosferica – Frequenza Critica - MUF

Quando un'onda elettromagnetica incontra uno strato ionizzato della ionosfera subisce un effetto analogo a quello descritto precedentemente per un fascio luminoso (legge di Snell), in quanto il diverso livello di ionizzazione N_e determina un diverso indice di rifrazione n secondo la relazione:

$$n = \sqrt{1 - 81 \frac{N_e}{f^2}}$$

La direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica subisce quindi una deviazione la cui entità è funzione della diversa densità di ionizzazione dello strato che attraversa, secondo una legge del tutto analoga alla legge di Snell vista precedentemente. Poiché dalla relazione di cui sopra si evidenzia che il valore dell'indice di rifrazione n è funzione anche della frequenza f questo comporta che a parità di livello di ionizzazione la capacità della ionosfera di deviare il fascio, come vedremo meglio più avanti, dipenderà anche dalla frequenza

si può quindi affermare che, in generale, un'onda elettromagnetica, attraversando uno strato ionizzato, subisce una serie di deviazioni che ne aumentano l'angolo di incidenza rispetto alla verticale fino a deviarla verso terra (figura 9).

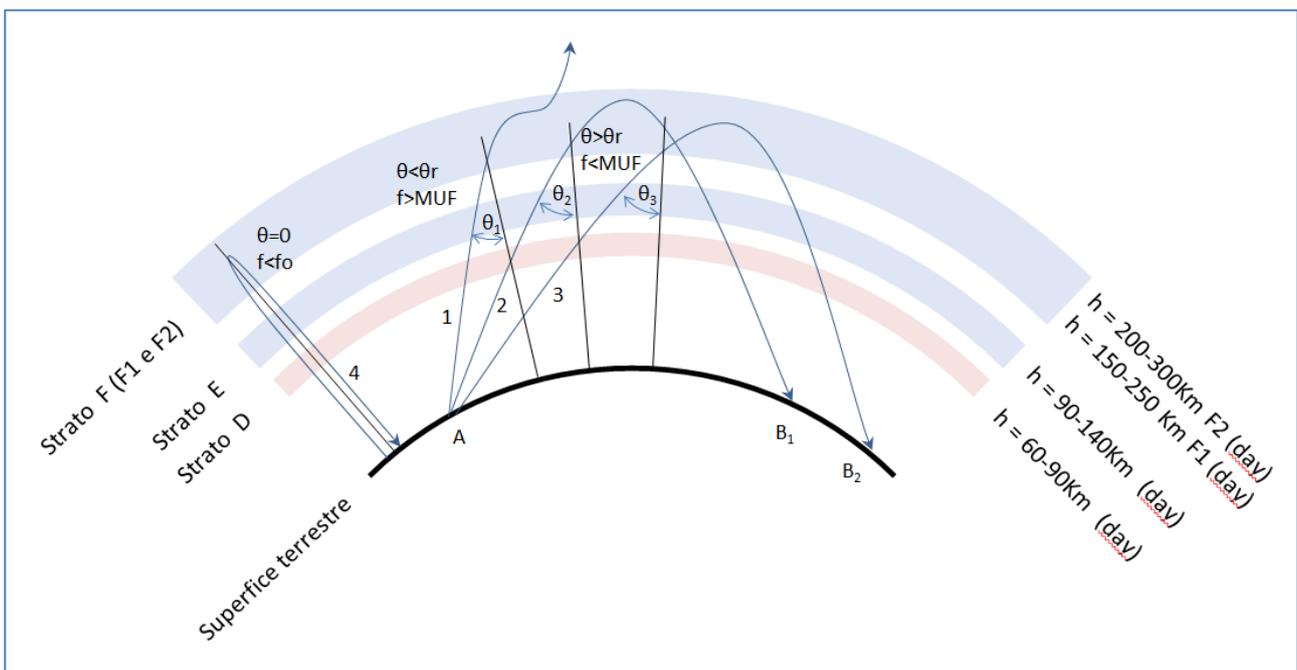


Fig.9 – effetto di diffrazione del fascio in funzione della frequenza e dell'angolo di incidenza

Se la frequenza è sufficientemente bassa, questo fenomeno di riflessione totale si verifica sempre, anche se l'angolo di incidenza è nullo (propagazione verticale, traiettoria 4 di figura 9). La più alta frequenza che consente il ritorno a terra di un'onda irradiata verticalmente, prende il nome di **frequenza critica fo** di un determinato strato e dipende direttamente dal livello massimo di ionizzazione N_{max} dello strato stesso:

$$f_0 = 9\sqrt{N_{max}}$$

Dal momento che la frequenza critica f_0 è funzione del livello di ionizzazione il suo valore subisce quindi variazioni sia nell'arco della giornata sia in funzione dell'attività solare e di tutti gli altri elementi che possono intervenire nel modificare il livello di ionizzazione come vedremo più avanti.

Il valore della frequenza critica degli strati ionizzati della ionosfera viene continuamente monitorata dalla rete mondiale degli Istituti di Geofisica attraverso l'impiego delle ionosonde che inviano treni di impulsi nello spettro 1-15 Mhz misurando il tempo di ritorno degli echi prodotti dalla riflessione, i dati elaborati permettono di redigere gli "ionogrammi" e di calcolare tutta una serie di parametri utili allo studio della ionosfera.

Di seguito, a titolo di esempio, un report aggiornato ogni 15 minuti disponibile sul sito del INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia di Roma) <http://ionos.ingv.it/Roma/latest.html>

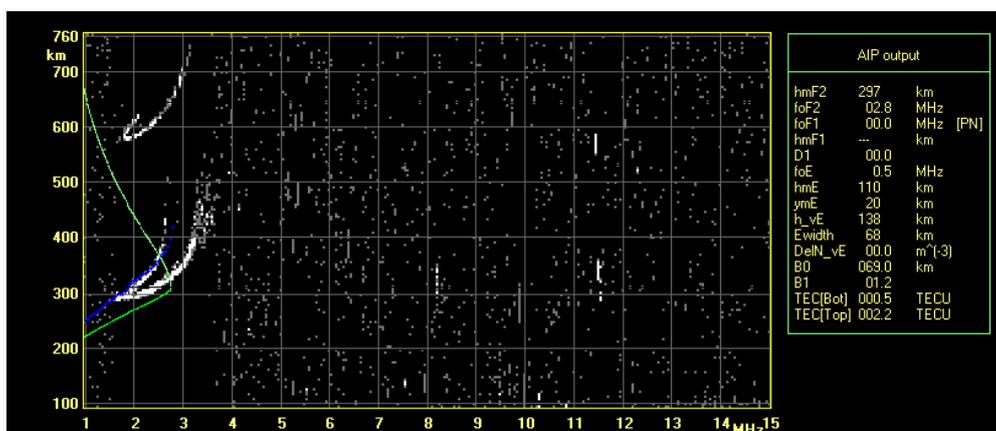


Fig.10 - esempio di ionogramma

Per frequenze superiori alla frequenza critica f_0 , analogamente a quanto visto nel caso della legge di Snell, esiste un angolo critico θ_r al di sotto del quale ($\theta < \theta_r$) l'onda elettromagnetica viene deviata (rifratta) ma non al punto tale da esser riflessa verso terra (traiettoria 1 di fig.9) mentre per angoli di incidenza maggiori di θ_r ($\theta > \theta_r$) il fascio viene riflesso verso terra (traiettorie 2 e 3 di fig.9).

Sempre dalla legge di Snell sappiamo però che il valore dell'angolo critico θ_r dipende dall'indice di rifrazione dello strato n che a sua volta dipende dal livello di ionizzazione e dalla frequenza, possiamo quindi affermare che per un determinato livello di ionizzazione massima N_{max} dello strato il valore dell'angolo critico θ_r dipenderà dalla frequenza utilizzata ovvero ribaltando il ragionamento esisterà una "Massima Frequenza Utilizzabile" (MUF) relativa ad un determinato strato che dipenderà dal valore di N_{max} dello strato stesso e dell'angolo θ (angolo di incidenza del fascio rispetto alla verticale) con cui il segnale raggiunge lo strato riflettente, ma poiché dal valore di N_{max} dipende anche il valore di f_0 (frequenza critica dello strato) possiamo ricavare la seguente relazione:

$$MUF = \frac{f_o}{\cos \theta}$$

Possiamo osservare però che l'angolo di incidenza θ dipende a sua volta dall'angolo di "take-off" (β) con cui il segnale viene irradiato dalla sorgente a terra (punto A di fig.11) nonché dall'altezza h dello strato riflettente rispetto a terra, in prima approssimazione possiamo quindi affermare che a parità di condizioni di ionizzazione N_{max} tanto più basso sarà l'angolo di take-off β tanto maggiore sarà la frequenza che potrò utilizzare.

Legata a questa prima considerazione è possibile farne una seconda, poiché come abbiamo visto la **MUF** dipende dalla frequenza critica dello strato f_o e dall'angolo di incidenza θ che a sua volta, come vedremo, dipende dall'angolo di "take-off" β e dall'altezza h dello strato stesso rispetto a terra, possiamo quindi affermare che a parità di condizioni di ionizzazione N_{max} e di altezza dello strato riflettente h il valore della **MUF** dipende dall'angolo di take-off β .

Facendo riferimento alla fig.11 si può osservare come il valore dell'angolo di incidenza θ sia limitato dalla curvatura terrestre e anche portando l'angolo di take-off β a zero non sia possibile aumentare l'angolo di incidenza rispetto alla verticale oltre un certo valore θ_{max} .

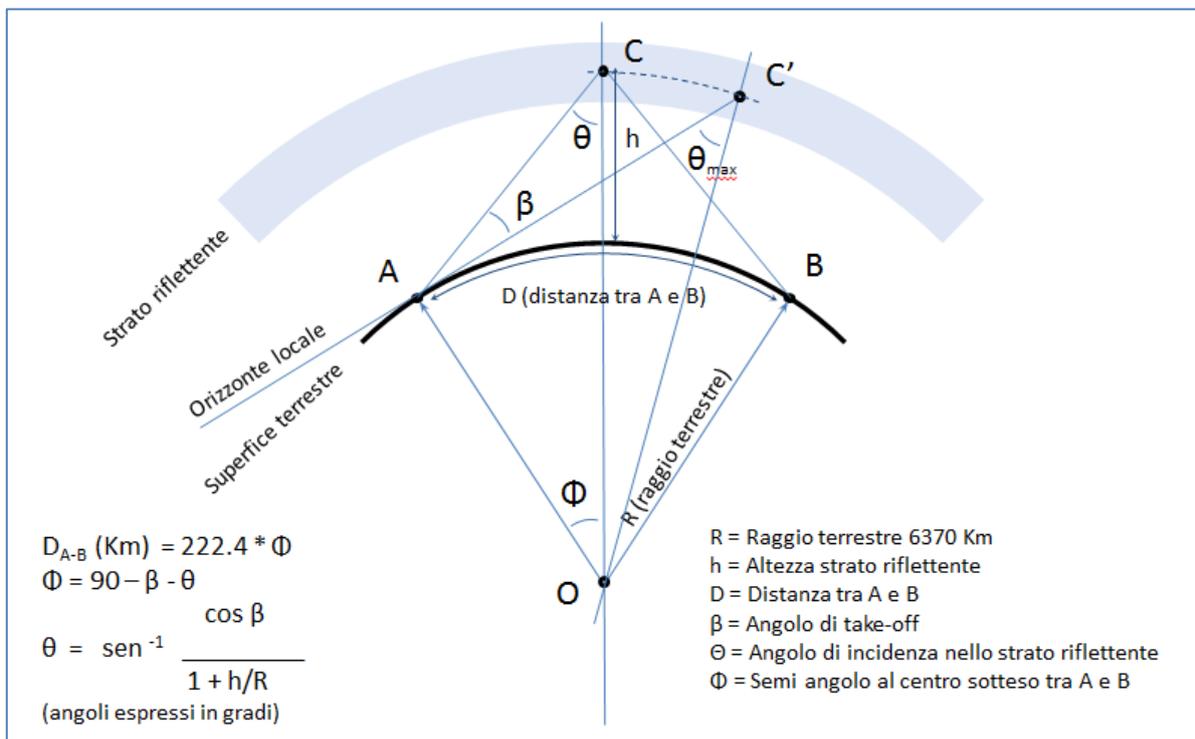


Fig.11 – variazione dell'angolo di incidenza θ in funzione dell'altezza dello strato h e dell'angolo di take-off β

Sempre facendo riferimento alla figura 11 è possibile ricavare il valore dell'angolo di incidenza θ in funzione dell'altezza dello strato riflettente h e dell'angolo di take-off β secondo la relazione:

$$\theta = \text{sen}^{-1} \frac{\cos \beta}{1 + h/R}$$

Dove R è il valore del raggio terrestre (6370Km), una volta noto l'angolo di incidenza θ e la frequenza critica f_o dello strato è possibile, come abbiamo visto sopra, determinare il valore della relativa MUF.

Una volta noto il valore dell'angolo di incidenza è possibile anche determinare la distanza (Skip_{a-b}) raggiungibile secondo la relazione:

$$\text{Skip}_{a-b} \text{ (km)} = 222.4 * (90 - \beta - \theta)$$

Come osservato precedentemente, esiste un valore massimo dell'angolo di incidenza θ_{max} che si determina quando l'angolo di take-off β è uguale a zero, cioè quando il segnale viene irradiato direttamente verso l'orizzonte. Questa condizione ci permette di determinare la distanza massima teorica raggiungibile (Skip_{Max}) con una singola riflessione ionosferica ("singolo hop")

$$\text{Skip}_{Max} \text{ (km)} = 222.4 * (90 - \theta_{max})$$

Dove il valore di θ_{max} dipende esclusivamente dall'altezza h dello strato riflettente:

$$\theta_{max} = \sin^{-1} \frac{1}{1 + h/R}$$

A titolo di esempio si può osservare come, ipotizzando un'altezza media dello strato F di 300 Km, la massima distanza teorica raggiungibile con un singolo hop risulti pari a 3835 Km.

Le tabelle sottostanti riportano le distanze teoriche raggiungibili per diverse altezze degli strati riflettenti E ed F:

Strato E	Altezza strato h (Km)	Angolo di Incidenza θ_{max} (gradi)	Angolo al centro Φ (gradi)	SKIP _{Max} (Km)
	100	79,9	10,1	2242
	110	79,4	10,6	2350
	120	79,0	11,0	2453
	130	78,5	11,5	2551
	140	78,1	11,9	2646
	150	77,7	12,3	2737

Tab. 1- Skip massimo strato E

Strato F	Altezza strato h (Km)	Angolo di Incidenza θ_{max} (gradi)	Angolo al centro Φ (gradi)	SKIP _{Max} (Km)
	200	75,8	14,2	3151
	220	75,2	14,8	3301
	240	74,5	15,5	3443
	260	73,9	16,1	3579
	280	73,3	16,7	3710
	300	72,8	17,2	3835
	320	72,2	17,8	3956
	340	71,7	18,3	4073
	360	71,2	18,8	4186
	400	70,2	19,8	4401

Tab. 2- Skip massimo strato F

Come vedremo in seguito tutti gli elementi fin qui esposti stanno alla base dello sviluppo dei vari modelli di elaborazione delle previsioni delle condizioni di propagazione ionosferica che sono disponibili in rete sotto varie forme.

La mappatura in tempo reale dei valori della MUF è un elemento molto utile per valutare lo stato della propagazione, questa informazione è disponibile in rete sotto varie forme, sempre a titolo di esempio cito due fonti che forniscono una presentazione facilmente interpretabile.

Sul sito <http://www.propquest.co.uk/graphs.php> è disponibile una visualizzazione grafica giornaliera di f_0 e MUF basati sui dati relativi a tre ionosonde europee FF051 Fairford, RL052 Chilton, DB049 Dourbes :

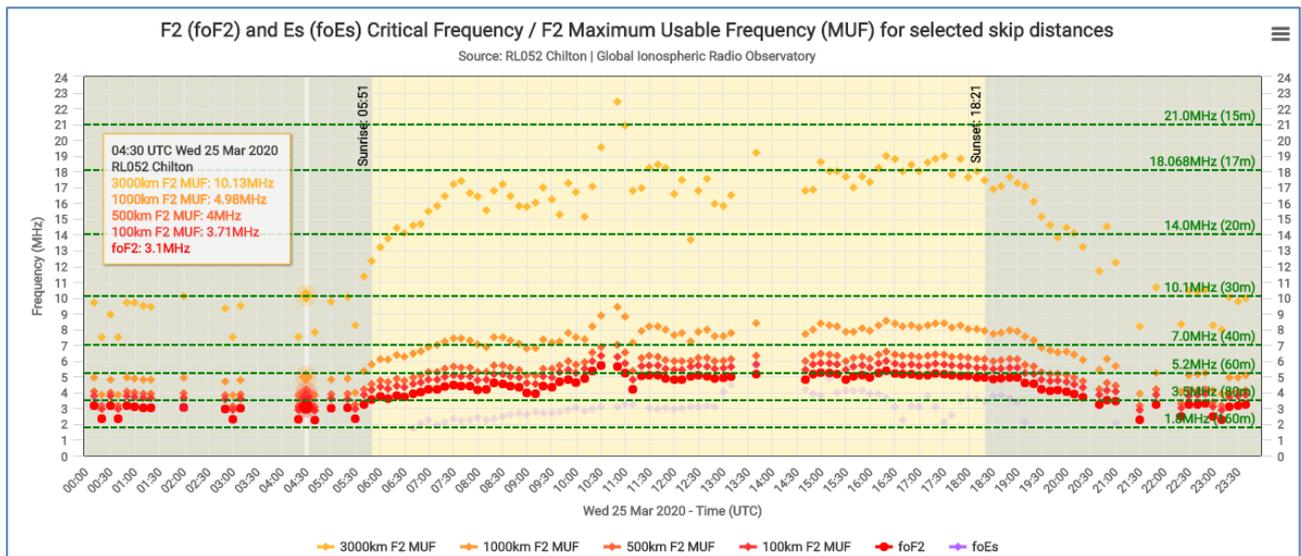


Fig.12- visualizzazione grafica andamento giornaliero di f_0 e MUF

Ma ancora più utile e di immediata lettura è la mappa delle MUF (3000KmF2MUF) disponibile sul sito <https://prop.kc2g.com/>

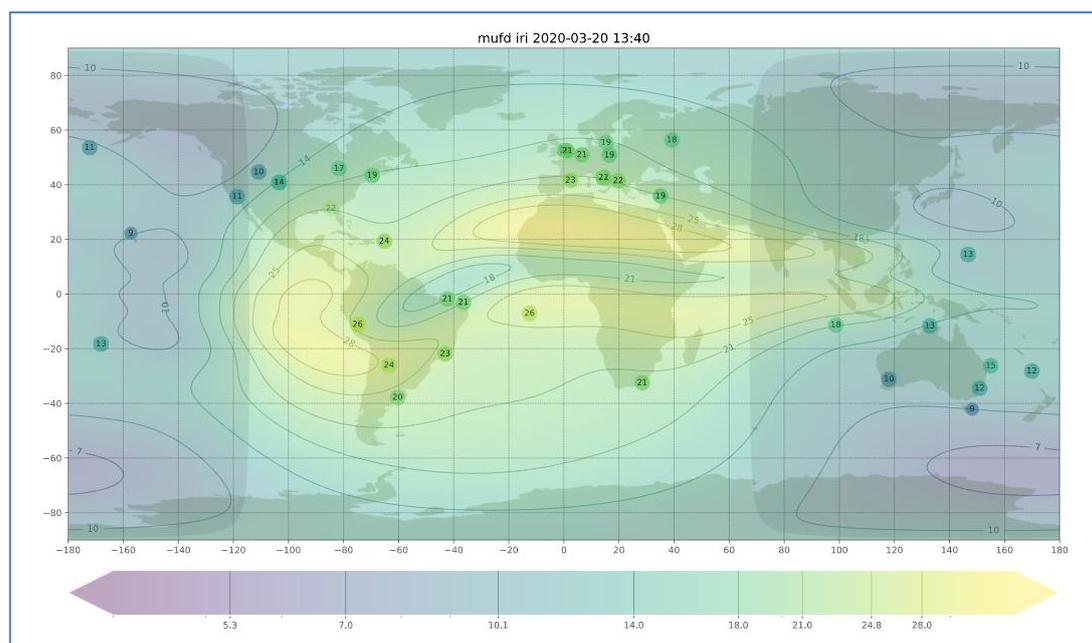


Fig.13 – Mappa 3000Km F2 MUF

Abbiamo appena visto come i vari livelli (strati) della ionosfera intervengono singolarmente nel processo di propagazione. Nella realtà però i vari strati della ionosfera intervengono congiuntamente nel processo fornendo ciascuno un contributo (positivo o negativo) per la formazione del percorso (path) trasmissivo.

Esistono diverse modalità di propagazione ionosferica a seconda della lunghezza del percorso e delle condizioni della ionosfera, modalità che possono risultare anche abbastanza complesse specialmente su lunghi percorsi dove un'onda può essere riflessa più di una volta (multihop path) prima di arrivare a destinazione.

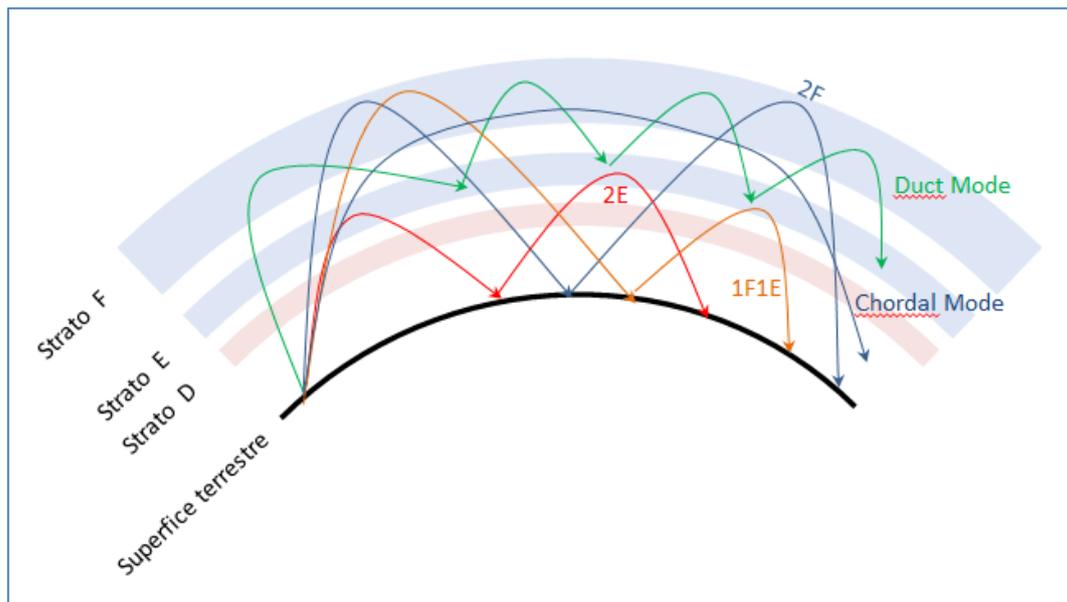


Fig. 14- Modalità di propagazione ionosferica

Quando la lunghezza del percorso supera la distanza massima possibile per un singolo hop (tabelle 1 e 2) l'unico modo per coprire tale percorso è utilizzare una modalità multi-hop, si definisce modalità di "primo ordine" quella che prevede il numero minimo di hop su un singolo strato, ad esempio un percorso di 7000 Km realizzato attraverso lo strato F prevede un minimo di 2 salti (2F) nel caso del primo ordine, ma la stessa distanza può essere coperta anche con 3 salti (3F) in questo caso si tratta di modalità di secondo ordine.

Stessa cosa se il percorso avviene attraverso lo strato E dove però a causa dell'altezza minore, a parità di numero di salti si coprirà un percorso minore, ad esempio un path via strato E con due salti (2E) potrà coprire al massimo una distanza di poco più di 4000 Km.

Le modalità più semplici sono appunto quelle in cui il percorso avviene attraverso la riflessione su un singolo strato (tipicamente lo strato F). Esistono anche modalità più complesse dove la riflessione e/o la rifrazione può coinvolgere più strati anche in maniera diversa come schematizzato in fig.14.

Tra le modalità complesse possiamo avere i casi in cui il percorso avvenga:

- Attraverso una sequenza di più salti su strati diversi es: 1F1E (linea gialla di fig.14)
- In modalità "Duct" (linea verde di fig.14) laddove una volta raggiunto lo strato F il segnale procede all'interno di un condotto (Duct) che si realizza attraverso rimbalzi multipli tra lo strato E e lo strato F senza tornare a terra fino a destinazione

- In modalità “Chordal” (linea blu di fig.14) laddove una volta raggiunto lo strato F il segnale procede lungo il bordo inferiore dello strato seguendone la curvatura per mezzo di una serie successiva di rifrazioni

Le modalità Duct e Chordal è più probabile che si presentino alle latitudini equatoriali (anomalia equatoriale) o lungo la “gray line” (zona di confine tra giorno e notte) e per la modalità Duct soprattutto nei periodi di scarsa attività solare quando i livelli di ionizzazione sono tali da generare una marcata zona di bassa ionizzazione tra lo strato E e lo strato F (fig.7) entrambe queste modalità permettono generalmente di avere una minore attenuazione in quanto il segnale radio non attraversa ripetutamente gli strati D e E come avviene nelle riflessioni multiple a terra.

C’è poi una ulteriore considerazione da fare, in tutti i ragionamenti fatti fino ad ora abbiamo ipotizzato, per semplicità, che gli strati che compongono la ionosfera siano “uniformi” in realtà non è così, come già accennato, in uno stesso momento il livello massimo di ionizzazione nonché la sua altezza non sono costanti ma variano in funzione della posizione geografica (latitudine e longitudine) nonché di altre cause minori e di fattori estemporanei ed imprevedibili che vedremo nel dettaglio più avanti .

Relativamente alla posizione geografica c’è da notare inoltre come di giorno il massimo livello di ionizzazione non si raggiunga in prossimità dell’equatore come sarebbe logico attendersi, ma si presenti sempre intorno 15°-20° di lat. Nord e 15°-20° di lat. Sud, (vedi fig. 15) questo fenomeno è noto con il termine di “Anomalia Equatoriale”. Di notte invece il minimo livello di ionizzazione dello strato F non si registra in corrispondenza dei poli ma si registra intorno ai 60° gradi di latitudine sia a Nord che a Sud questa anomalia prende il nome di “Depressione delle Medie Latitudini”.

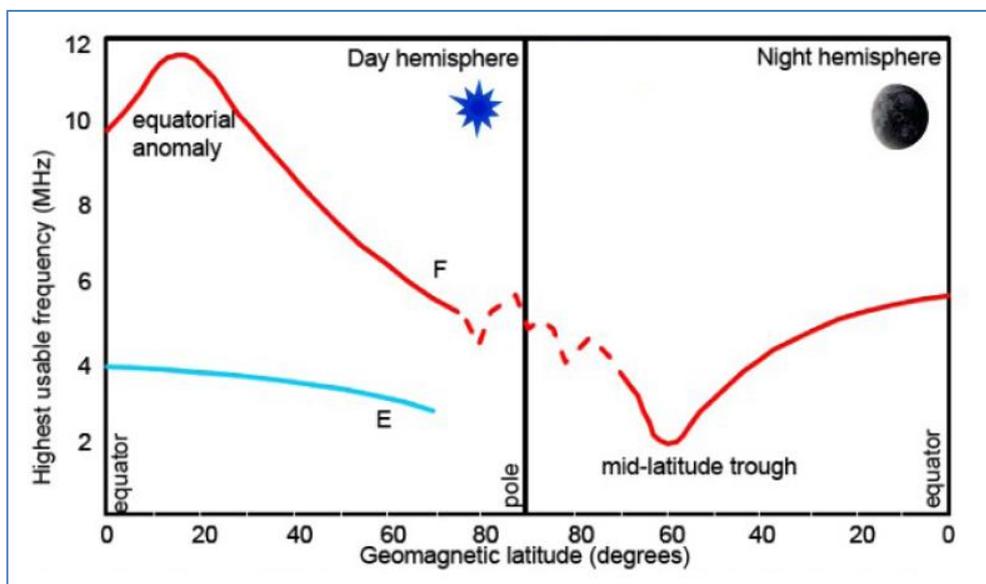


Fig.15 – Variazione diurna e notturna della f_0 alle diverse latitudini

Tutto questo comporta il fatto che la superficie dello strato ionizzato non sia uniformemente sferica ma possa presentare gibbosità (concave o convesse) che, oltre ad essere una delle cause della modalità “chordal” di cui sopra, possano dare origine a fenomeni di focalizzazione e defocalizzazione del fascio causando variazioni anche molto ampie del livello del segnale.

A questo proposito vale la pena ricordare come all'inizio dello studio dei fenomeni legati alla propagazione ionosferica, per molti anni, la comunità scientifica si è interrogata su quello che era definito il "il paradosso delle radiocomunicazioni" ovvero per molto tempo non si era riusciti a dare spiegazione al fatto che il livello dei segnali ricevuti via riflessione ionosferica risultasse, in certi momenti, molto superiore (anche di 40-50 dB) rispetto a quello che il calcolo di attenuazione nello spazio libero indicava per un percorso di pari lunghezza.

La spiegazione è stata poi data appunto dalla scoperta dell'effetto di "focalizzazione" prodotto dalla curvatura dello strato riflettente analogamente a quello che avviene in ottica geometrica in uno specchio parabolico.

Influenza del sole sulla propagazione ionosferica

Come abbiamo visto la propagazione ionosferica è resa possibile dalla presenza degli stati ionizzati dell'atmosfera terrestre e abbiamo anche visto che il livello di ionizzazione degli strati incide in maniera significativa sulla frequenza e sul modo con cui un segnale radio può essere propagato a lunga distanza per riflessione ionosferica.

E' quindi intuitivo comprendere come dall'attività solare, che è sostanzialmente responsabile della ionizzazione dei gas presenti nell'atmosfera, dipendano direttamente le condizioni di propagazione.

Vedremo adesso un po' più in dettaglio la relazione esistente tra l'attività solare, con i suoi parametri caratteristici, e il comportamento della ionosfera in relazione alle condizioni di propagazione.

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.

Ciclo undecennale dell'attività solare (Sunspot cycle)

Sulla superficie solare (fotosfera) sono spesso presenti delle zone circoscritte caratterizzate da un'intensa attività magnetica (2000-3000 Gauss) e da una temperatura nettamente minore (4000°K) rispetto alle aree circostanti (6000°K) che le rende visibili all'osservazione come macchie più scure, da questo il nome di "macchie solari" (sunspot). Le macchie solari si presentano generalmente a coppie e in gruppi e sono sostanzialmente degli enormi vortici magnetici del tutto simili ai vortici ciclonici dell'atmosfera terrestre.

L'esistenza delle macchie solari fu scoperta da Galileo Galilei nel 1612 ma l'osservazione sistematica del fenomeno risale alla metà dell'800 quando l'astronomo svizzero Rudolf Wolf introdusse un metodo per il conteggio che prende appunto il suo nome (numero di Wolf) metodo recentemente rivisitato e che prende

adesso il nome di SN (Sunspot Number). Il numero delle macchie solari presenti varia con ciclicità dalla assenza totale ad un valore massimo di circa 300-350 anche se in passato sono stati registrati picchi fino a oltre 500 (1870). In realtà come detto il numero registrato (SN) non è il numero effettivo di macchie ma è il risultato di un calcolo ponderato $SN = K * (10 * N_g + N_s)$. Il periodo medio tra il massimo di un ciclo e il successivo è di 11,2 anni.

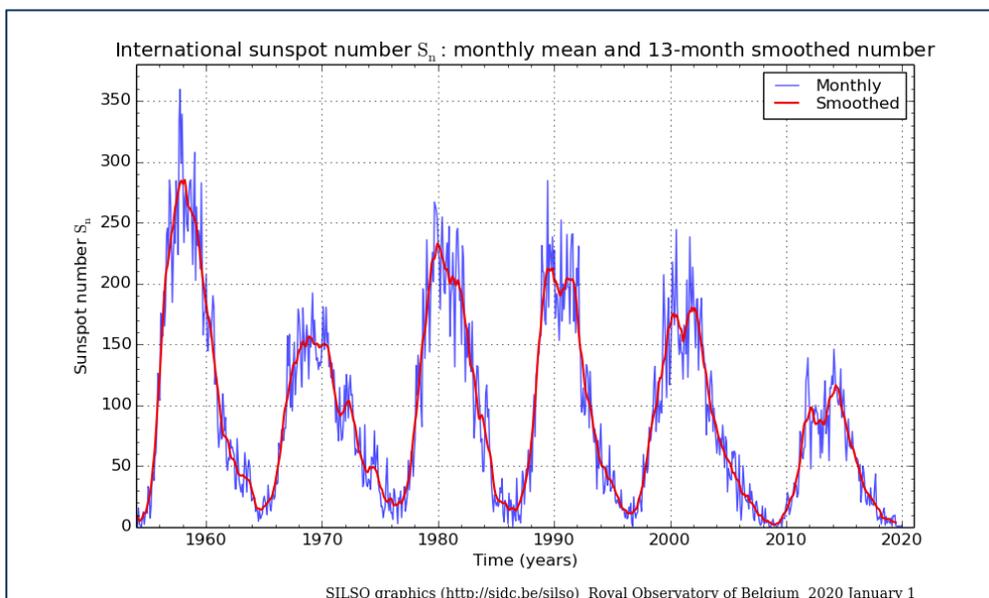


Fig.16 – Andamento degli ultimi 6 cicli solari (19°-24°)

La comparsa delle macchie solari è indice dell'aumento dell'attività solare, vi è una relazione diretta tra il numero delle macchie solari e il flusso di radiazioni emesse dal sole che coprono lo spettro che va dalle frequenze radio ai raggi γ e, in particolare, i raggi X e i raggi UV sono come detto i principali responsabili del processo di ionizzazione della ionosfera.

Indicatori puntuali del livello di attività solare sono il numero di macchie solari **SN** (Sunspot Number), l'indice di flusso solare **SFI** ($F_{10.7}$ 2800 MHz Solar Flux Index) **EUV** l'indice di radiazione ultravioletta (Extreme Ultraviolet solar radiation index 10 – 120 nm) tra i quali c'è una proporzionalità diretta.

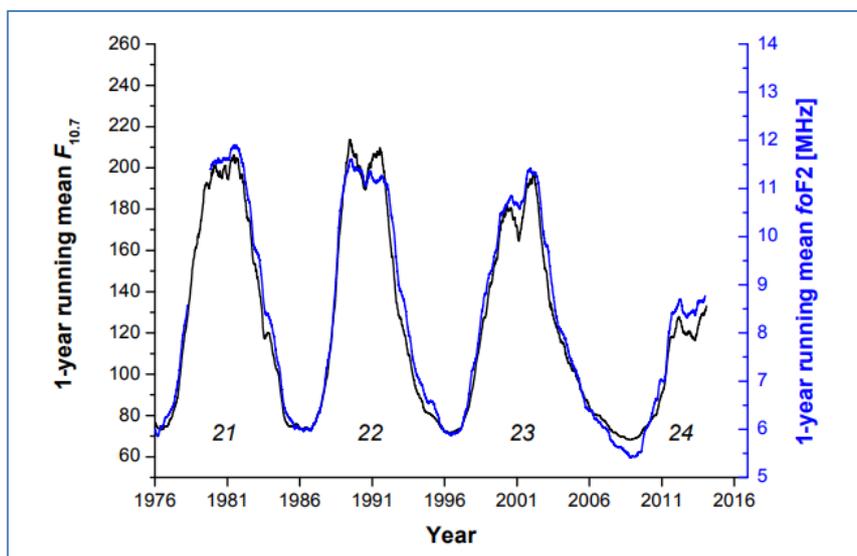


Fig.17- variazione della frequenza critica in rapporto al livello di SFI

La figura 17 ci mostra come il valore massimo della frequenza critica f_0 dello strato F2 segua in maniera diretta l'andamento del ciclo solare, in particolare il grafico di fig.6 mostra i valori massimi della frequenza critica dello strato F2 registrati a Roma (linea blu) correlati al valore medio del flusso solare SFI ($F_{10.7}$ 2800 MHz Solar Flux Index) degli ultimi 4 cicli solari (linea nera). Dal grafico si può osservare come il valore massimo di f_0 F2 passi da circa 11-12 MHz in corrispondenza dei massimi dei cicli solari a meno di 6MHz in corrispondenza dei minimi.

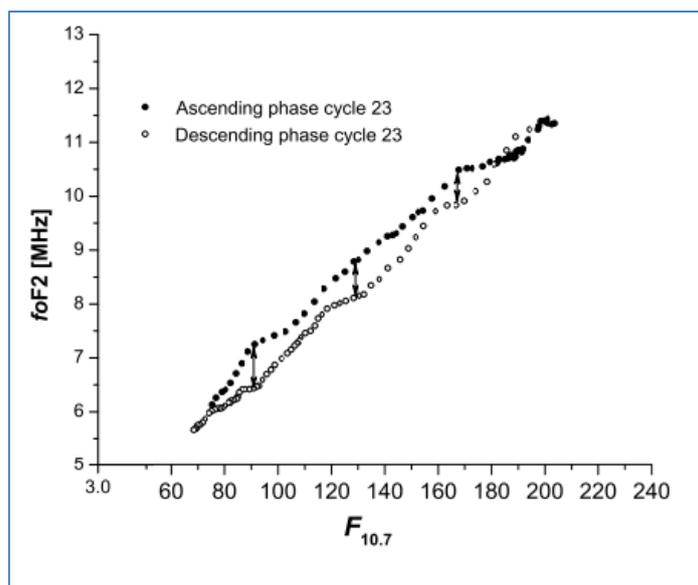


Fig.18 – Effetto di isteresi del ciclo solare

C'è un'ultima considerazione da fare, l'osservazione sistematica dell'attività solare da parte della comunità scientifica ha permesso di osservare la presenza di un ciclo di isteresi tuttora in fase di studio (fig.18) che determina un lieve incremento della frequenza critica f_0 nella fase ascendente del ciclo rispetto ai valori dei principali indici, mentre nella fase discendente a parità di valore degli indici il valore di f_0 risulta inferiore ciò determina che a parità di attività solare ci potremmo attendere condizioni mediamente migliori nella prima metà (fase ascendente) del ciclo solare rispetto alla seconda.

Ciclo di rotazione solare sul proprio asse (27 giorni)

Il sole come è noto è costituito da plasma (gas ionizzato ad altissima temperatura) ne consegue che il moto di rotazione non è uniforme lungo la superficie esterna (fotosfera) ma la velocità di rotazione è maggiore all'equatore e diminuisce verso i poli. Sull'equatore solare il periodo di rotazione è di 23,4 giorni (periodo siderale) ma in realtà osservandolo dalla terra appare più lungo in quanto 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.

Questo ci permette quindi di affermare che un eventuale gruppo di macchie solari presenti nella zona equatoriale del sole, osservate dalla terra, risultano in movimento fino scomparire per poi ricomparire e raggiungere la stessa posizione dopo 27 giorni a causa della rotazione solare.

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 vi sarà 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.

Tale effetto è uno dei pochi effetti che presenta una ciclicità regolare, si può quindi affermare che, specialmente nei periodi di elevata attività solare, condizioni ottimali di propagazione, ma anche condizioni negative, possono ripetersi con tale ciclicità per la comparsa e la scomparsa ciclica delle macchie dovute alla rotazione solare.

L'effetto è facilmente rilevabile anche dal grafico di fig.16 dove la linea azzurra rappresenta l'andamento mensile del SSN che come si può ben notare fluttua costantemente da un minimo ad un massimo intorno al valor medio (linea rossa).

Ciclo orbitale terrestre (percorso orbitale della terra intorno al sole)

Come è noto, 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 (fig.19)

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 strati 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.

Come si vede in figura 19 in corrispondenza del solstizio d'estate (21 giugno) la radiazione solare così come le ore di luce raggiungeranno il massimo nell'emisfero nord ed il minimo in quello sud mentre in corrispondenza del solstizio d'inverno (22 dicembre) accadrà il contrario.

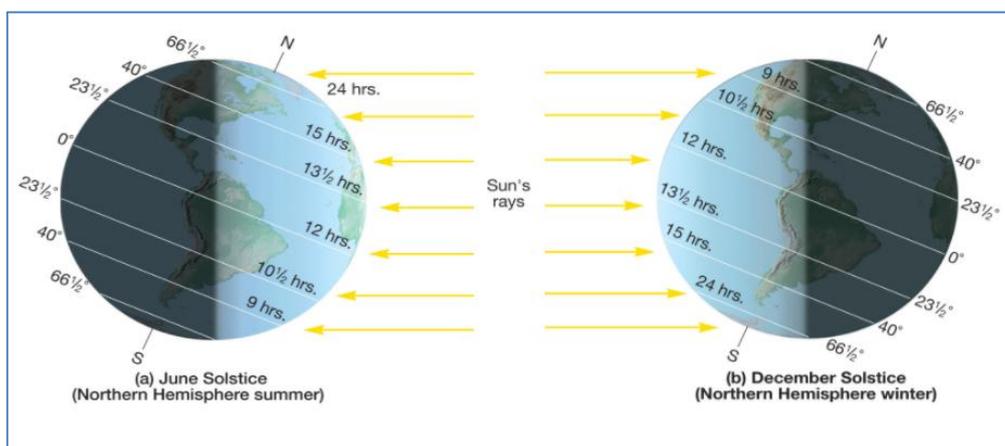


Fig.19 – variazione stagionale del rapporto giornaliero tra la durata del giorno e della notte

In corrispondenza degli equinozi invece (21 marzo – 23 settembre) la radiazione solare sarà massima all'equatore e le ore di luce saranno le stesse per i due emisferi

Ciò comporta, in prossimità dei solstizi, una significativa differenza nei livelli di ionizzazione soprattutto degli strati bassi (D e E) che in particolare saranno minori durante le stagioni invernali dei due emisferi in

quanto le radiazioni attraversando in modo obliquo e per un periodo di tempo minore l'atmosfera terrestre produrranno un minore effetto ionizzante mentre accadrà l'opposto durante le stagioni estive.

La variazione stagionale del livello di ionizzazione è in generale minore per lo strato F dove addirittura l'efficienza di riflessione è maggiore in inverno in quanto la differenziazione dello strato F nei substrati F1 e F2 risulta minore come è visibile in fig. 20 dove è riportato il livello medio di ionizzazione NmF2 dello strato F2 in corrispondenza delle 4 stagioni per il massimo dei cicli 22 (1990-1991) e 23 (2001-2002)

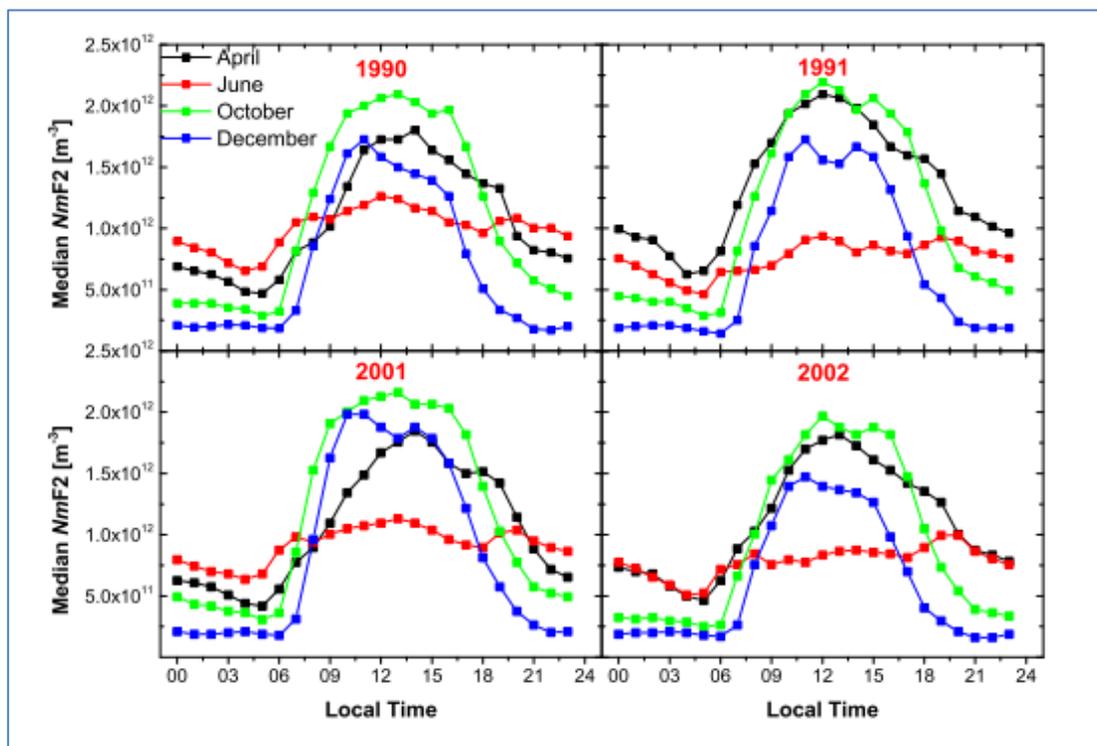


Fig.20 –Variazione stagionale dell'andamento giornaliero del livello medio di NmF2

L'effetto della stagionalità sullo strato F si manifesta principalmente sulla diversa variazione giornaliera della f_o (frequenza critica) e quindi di conseguenza delle MUF variazioni che in particolare saranno più evidenti alle alte latitudini mentre i valori nelle aree tropicali non subiscono significative variazioni.

Sebbene quando si parla dei fenomeni legati alla propagazione ionosferica sia d'obbligo l'uso del condizionale, in quanto le variabili in gioco sono molteplici e spesso non prevedibili, è possibile però su base statistica ipotizzare alcuni comportamenti ricorrenti.

Uno dei più noti è quello che si determina nella fase di passaggio dal giorno alla notte in corrispondenza della zona interessata dall'alba e dal tramonto (Gray Line). In corrispondenza della zona di confine tra giorno e notte si determinano condizioni di propagazione particolarmente favorevoli in quanto, come abbiamo visto precedentemente, le variazioni di ionizzazione degli strati bassi (D e E) della ionosfera sono molto più rapide rispetto agli strati alti (F1 e F2) conseguentemente in corrispondenza di questa zona di confine si avrà una minore attenuazione nel transito negli strati bassi mentre l'efficienza della riflessione negli strati alti è ancora elevata. Ciò comporta che i percorsi che interessano in tutto o in parte la zona di confine tra giorno e notte saranno mediamente favoriti da una minore attenuazione.

Poiché come abbiamo visto (fig.19) la direzione della "gray line" varia in funzione delle stagioni si può affermare che in corrispondenza degli equinozi sarà favorita la direttrice nord-sud mentre in corrispondenza dei solstizi la gray line risulterà inclinata di circa 23° e saranno favorite le direttrici

nordovest-sudest all'alba e nordest-sudovest al tramonto in estate, e viceversa in inverno. È da tenere però presente che questo effetto è più evidente per la parte alta delle HF dove i percorsi avvengono prevalentemente attraverso la parte "illuminata" della ionosfera mentre per le gamme basse (40m ma soprattutto 80m) le condizioni migliori si hanno in piena notte quando gli strati D e E non sono presenti mentre il livello di ionizzazione dello strato F è tale da presentare sempre una MUF superiore alla frequenza di lavoro, solo nei periodi di minimo solare la banda dei 40m può alcune volte risultare "chiusa" di notte in quanto la MUF può scendere sotto i 7 Mhz.

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

L'alternanza giorno notte, come abbiamo visto, determina due variazioni nel comportamento della ionosfera.

La prima interessa gli strati bassi D e E dove, come già visto, 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

I conseguenti 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 spesso 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 quando diminuita l'attenuazione degli strati bassi, i livelli di ionizzazione dello strato F sono ancora molto elevati, da notare infatti che generalmente i valori di MUF si mantengono elevati per alcune ore dopo il tramonto.

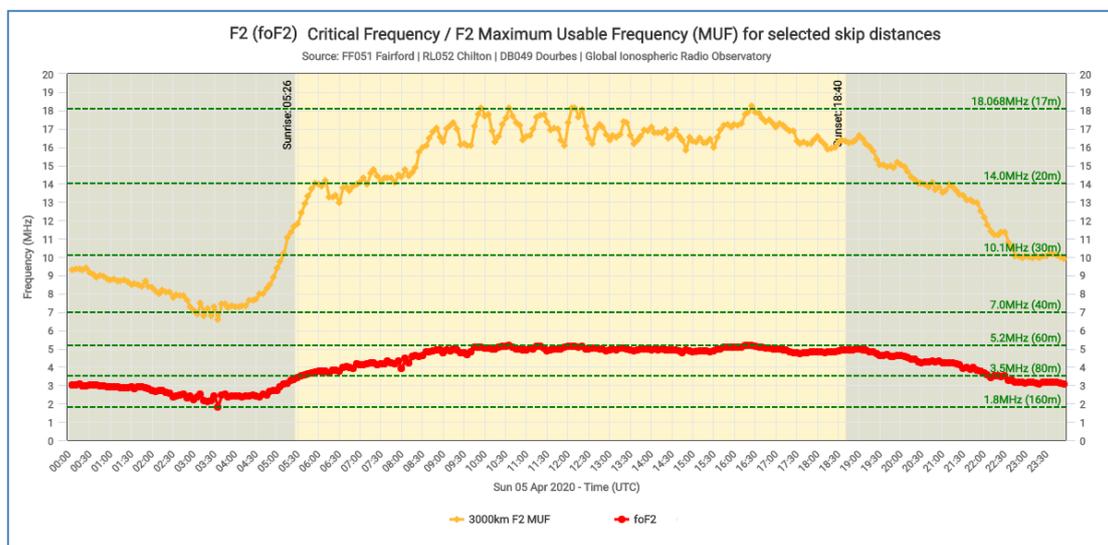


Fig.21- andamento giornaliero di f_0 e MUF(3000KmF2)

A titolo di esempio in figura 21 è riportato l'andamento giornaliero della $f_o F2$ e della MUF (3000Km F2 MUF) relativo all'Europa nord-occidentale rilevato domenica 5 Aprile 2020.

Per quanto riguarda invece le bande basse le migliori condizioni per il traffico DX si hanno nel periodo notturno dove l'effetto negativo degli strati D e E non è più presente mentre, come detto, i livelli di MUF risultano ancora sufficientemente elevati, anche in periodi di scarsa attività solare, è infatti raro che la MUF scenda sotto i 6-7 MHz (ovvero $f_o F2 < 2\text{MHz}$) e soprattutto in 80m le condizioni migliori per il DX si hanno proprio a tarda notte nei periodi di scarsa attività solare quando la MUF scende a valori minimi riducendo il contributo del rumore e dei disturbi provenienti da angoli di radiazione elevati.

Influenza sulla propagazione ionosferica di eventi improvvisi (SID)

Abbiamo visto come il principale elemento responsabile della ionizzazione sia la radiazione solare e come il livello di ionizzazione dipenda dall'intensità della radiazione e quindi principalmente dall'andamento del ciclo solare.

Ci sono però anche altri fattori che possono influenzare il livello di ionizzazione ovvero quelli che sono classificati come SID (Sudden ionospheric disturbance) eventi improvvisi che possono essere anche indipendenti dal ciclo solare con associate maggiori emissioni di radiazioni ionizzanti (raggi UV e X) e di particelle ionizzate HSS (High Speed Stram), oltre all'effetto dovuto al passaggio di meteoriti nell'alta atmosfera, tra questi i principali sono:

- Brillamenti Solari (Flares)
- Buchi Coronali (Coronal Holes)
- Eruzioni solari nella cromosfera (CME)
- Tempeste magnetiche
- Passaggio di meteoriti nell'alta atmosfera

Brillamenti Solari (Flares)

I brillamenti solari (Solar Flares) sono improvvise esplosioni di energia che coinvolgono il plasma solare a livello della fotosfera, causate da un'improvvisa e repentina variazione degli enormi campi magnetici presenti sulla superficie solare in prossimità delle macchie solari. A tali esplosioni sono associate emissioni di energia e di radiazioni ionizzanti di elevatissima intensità e in alcuni casi i brillamenti solari possono essere accompagnati anche da espulsione di massa coronale (CME).

Le forti radiazioni emesse durante un brillamento solare possono provocare disturbi alle comunicazioni radio in HF nelle aree esposte alla radiazione solare (aree illuminate) a causa del forte aumento del livello di ionizzazione dello strato D con il conseguente aumento dell'effetto di assorbimento che può raggiungere un livello tale da rendere inutilizzabili soprattutto le bande basse per un periodo che può durare fino a 36h. I brillamenti sono anche una delle cause del fenomeno delle "Aurore Boreali".

Buchi Coronali (Coronal Holes)

I Buchi Coronali CH (Coronal Holes) appaiono come zone circoscritte della corona solare più fredde e meno dense delle aree circostanti, in queste zone si registra una forte concentrazione dei campi magnetici e risultano essere le principali sorgenti del “vento solare ad alta velocità” HSS (High Speed Stream). I buchi coronali possono svilupparsi in maniera casuale in qualsiasi zona della corona solare ma generalmente hanno origine intorno alle zone polari per espandersi e migrare verso le latitudini equatoriali, la loro presenza è più comune e persistente nei periodi di minimo del ciclo solare.

Quando il livello del HSS originato da un CH è elevato, questo può raggiungere la terra e influenzare la magnetosfera terrestre causando variazioni nel livello di ionizzazione e nell'altezza degli strati della ionosfera e in casi più rari, se l'intensità del HSS è molto elevata, si possono generare vere e proprie tempeste magnetiche anche se di modesta entità.

Un valido indicatore di una perturbazione magnetica in atto è il parametro **Kp** (Estimated Planetary 3 hour K index) il cui valore ha una stretta relazione con l'intensità e la velocità con cui il vento solare investe la magnetosfera terrestre

Eruzioni solari nella cromosfera (CME)

Una espulsione di massa coronale (CME Coronal Mass Ejection) è un rilascio significativo di plasma solare che può avvenire a seguito di una eruzione solare o di un brillamento, la quantità di plasma rilasciato è generalmente notevole e può raggiungere valori pari a miliardi di tonnellate di materiale coronale, questo comporta che associato al materiale espulso sia presente anche un significativo campo magnetico.

Le espulsioni di massa coronale sono spesso associate ad altre forme di attività solare ma al momento non stata stabilita una relazione puntuale, sono presenti lungo tutto l'arco del ciclo solare anche se si manifestano con maggiore frequenza nei periodi di massimo del ciclo solare.

Il plasma espulso si espande nello spazio allontanandosi dal sole con una velocità variabile da un minimo di 250 Km/s fino ad un massimo di 3000 Km/s questo significa che può raggiungere la Terra in un tempo che va da 18 ore fino a diversi giorni dal momento dell'eruzione.

In funzione dell'entità dell'evento e delle caratteristiche del campo magnetico associato possono generare grandi perturbazioni magnetiche nella magnetosfera terrestre causando intense aurore boreali e tempeste magnetiche anche di forte intensità.

Tempeste magnetiche (Geomagnetic Storm)

E' un grave disturbo della magnetosfera terrestre causato dall'interazione tra il campo magnetico terrestre e intensi flussi magnetici e di plasma solare che raggiungono la terra a seguito di un Flare o di un CME.

Le tempeste magnetiche oltre a modificare le caratteristiche della magnetosfera terrestre deformandone il percorso delle linee di flusso, provocano il riscaldamento della termosfera modificando la densità e il livello di ionizzazione della parte alta della ionosfera, nei casi più gravi si può arrivare al blocco totale di tutte le comunicazioni radio e le correnti indotte delle intense perturbazioni magnetiche (GIC) possono arrivare a causare disturbi e addirittura danneggiare reti telefoniche, elettriche, dispositivi elettronici e computer.

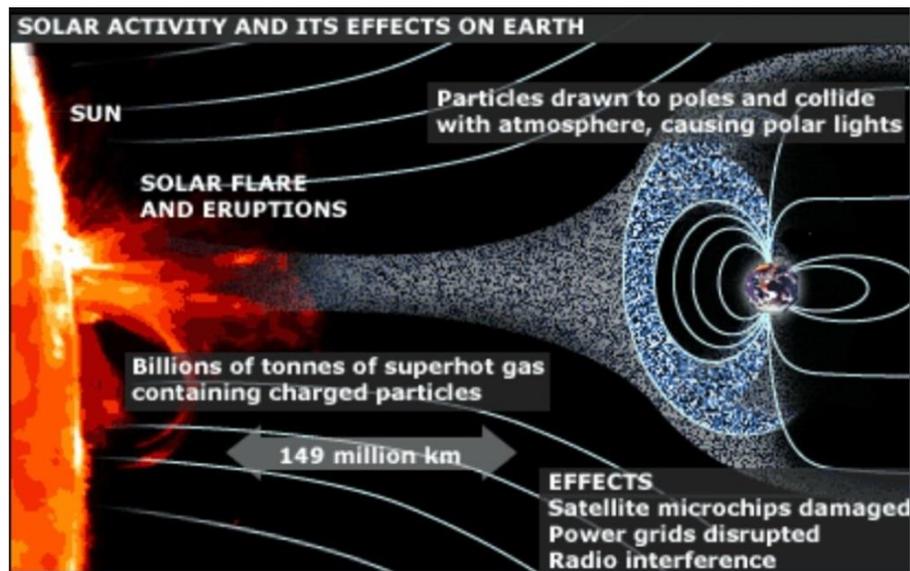


Fig.22- Effetto di una CME sulla magnetosfera

La più grande tempesta magnetica mai registrata, derivante presumibilmente da un CME, risale ai primi di settembre del 1859 (Carrington Event) che provocò seri danni alla rete telegrafica statunitense ed un'intensa aurora boreale visibile anche a latitudini tropicali. In periodi più recenti il 13 marzo 1989 una tempesta magnetica di forte intensità causò un blackout di 9 ore della rete elettrica canadese.

Passaggio di meteoriti nell'alta atmosfera

Credo sia capitato a tutti di vedere in una notte stellata la scia luminosa di una "stella cadente", come è noto si tratta dell'effetto luminoso causato dall'ingresso di un meteorite nell'atmosfera terrestre che a causa dell'elevato attrito innesca il processo di ablazione della materia con rilascio di energia, il fenomeno si presenta ad altezze comprese tra i 100 e 150 km e oltre all'effetto luminoso il rilascio di energia provoca la forte ionizzazione dei gas presenti nella zona attraversata che a sua volta sono in grado di riflettere i segnali radio per periodi che vanno da alcuni secondi fino a diversi minuti, questo fenomeno è noto come "Meteor Scatter" .

Glossario dei parametri relativi all'attività solare che hanno impatto sulla propagazione ionosferica

Di seguito sono riportati i principali parametri che caratterizzano l'attività solare, alcuni dei quali già citati nelle pagine precedenti e che possano avere un impatto sulle condizioni della propagazione ionosferica.

Per ciascuno di essi è riportata una descrizione sintetica e una indicazione di massima circa l'impatto sulle condizioni di propagazione, i valori correnti di tali parametri sono disponibili in rete su molti siti e più sotto è riportato un elenco di link per potervi accedere.

SN **Sunspot Number** - Rappresenta il valore "calcolato" giornaliero delle macchie solari osservate sulla superficie del sole, il calcolo è effettuato secondo la formula di Wolf (numero di Wolf) $SN = K * (10 * N_g + N_s)$ dove K è un coefficiente che tiene conto del metodo di osservazione (generalmente $K < 1$) N_g è il numero di gruppi di macchie osservati N_s è il numero di macchie singole osservate. Il valore di SN è compreso tra 0 (assenza di macchie) e 528 valore più alto registrato il 26/8/1870 durante l' 11° ciclo. E' opportuno ricordare però che spesso viene utilizzato un valore "mediato" **SSN** (Smoothed Sunspot Number) su base mensile o su base annuale (13 mesi) quest'ultimo è quello utilizzato per classificare il massimo di un ciclo solare, a titolo di esempio il 24° ciclo appena concluso ha registrato un SSN massimo di 113 mentre il ciclo che ha registrato il valore di SSN più alto in assoluto è stato il 19° ciclo con 269.

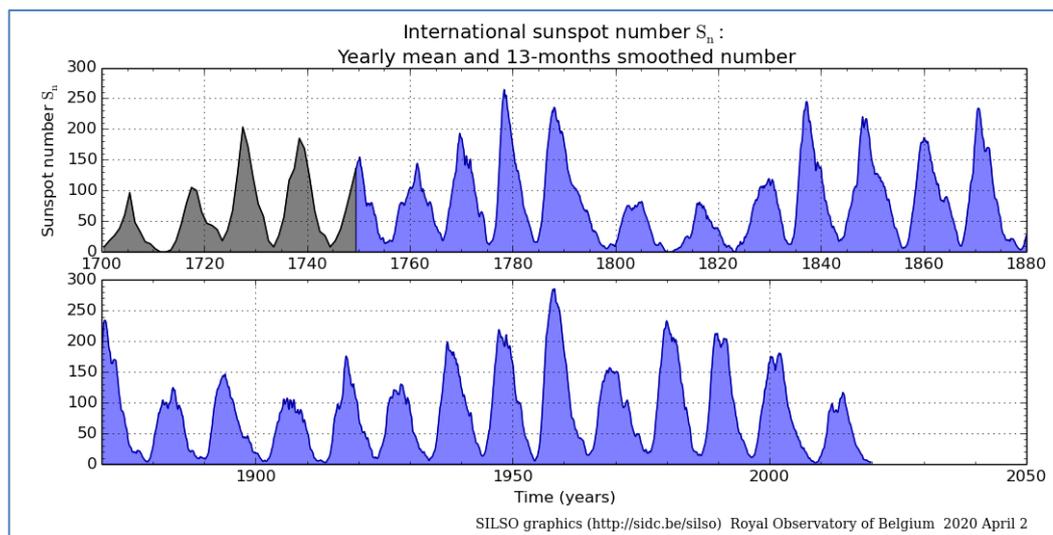


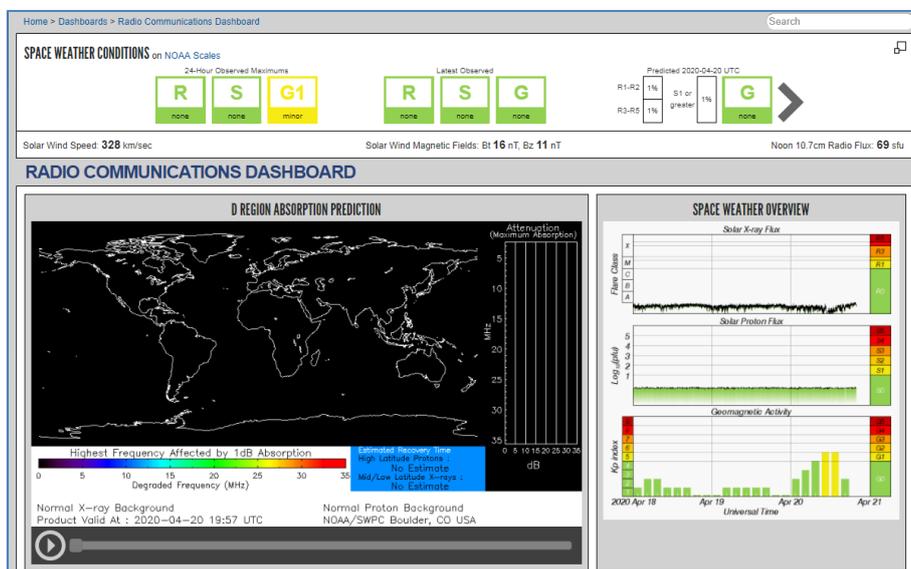
Fig.23

SFI _{10.7} **Solar Flux Index** – indica il valore della radiazione solare misurato giornalmente a 2800MHz (10,7 cm). E' un valido indicatore del livello di ionizzazione degli strati alti della ionosfera. Il valore di SFI è generalmente compreso tra un minimo di 50 e un massimo di 300 s.f.u. (solar flux unit) ed ha uno stretto legame con il livello dell'attività solare e il numero di macchie presenti.

EUV **EUV Solar Radiation** – E' la radiazione solare che copre lo spettro compreso tra 10 e 120 nm ha origine nella cromosfera e nella corona solare ed è responsabile del riscaldamento e della ionizzazione dell'atmosfera terrestre nel range compreso tra 80Km e 600Km di altezza, zona in cui la radiazione viene pressochè totalmente assorbita dando origine appunto alla ionosfera, Il livello della radiazione EUV non è facilmente misurabile a terra a causa dell'assorbimento totale ma è possibile solo attraverso i satelliti. Il livello della radiazione EUV segue l'andamento dell'attività solare di cui è uno dei principali indicatori

- 304A** **304 Angstroms Index** – Indica l'intensità della radiazione solare alla lunghezza d'onda di 30,4 nm che è la radiazione emessa del He+ elemento principale presente nella fotosfera solare. Analogamente a SFI è un valido indicatore del livello di ionizzazione dello stato F in quanto la radiazione dovuta al He+, costituisce quasi la metà della radiazione EUV complessiva che è, come abbiamo visto, una delle maggiori responsabili del processo di ionizzazione della ionosfera terrestre.
- X-Ray** **Hard X-Ray Index** – E' l'indice relativo al livello della radiazione solare compresa nello spettro 0,1 nm e 0,01 nm, ha un particolare impatto sullo strato D che è il maggior responsabile dell'assorbimento dei segnali radio soprattutto nello spettro basso delle HF. Il NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) ha elaborato una scala di misurazione che va da A0.0 a X9.9 la lettera (A,B,C,M e X) indica l'ordine di grandezza i numeri indicano il livello in dettaglio. Alti livelli di emissione di Hard X-Ray si registrano durante i brillamenti solari e le CME di cui sono uno dei principali indicatori, A/B=Normal, C=Active, M=Moderate X=Extreme.
- Kp** **Planetary K Index** – E' il principale indice dell'attività geomagnetica è elaborato sui dati forniti dalla rete dei 13 principali istituti di geofisica che registrano continuamente il livello dell'attività geomagnetica. Il dato è elaborato e aggiornato ogni 3 ore ed è fornito su una scala che va da 1 a 9 dove i valori da 1 a 4 indicano una normale attività geomagnetica mentre i valori superiori a 4 indicano una tempesta magnetica in corso.
- Ap** **Planetary A Index** – Derivato direttamente dall'indice Kp questo indice fornisce un dato medio giornaliero del livello di attività magnetica. I valori riportati vanno da 0 a 400 e mentre l'indice Kp registra anche perturbazioni improvvise nel campo geomagnetico che possano non comportare un aumento significativo del dato su base giornaliera, un valore alto di Ap indica invece che il campo geomagnetico è instabile e che potrebbero esserci quindi significative ricadute sulla propagazione con segnali fluttuanti fino ad arrivare a veri e propri blackout.

I valori correnti dei parametri sopra citati possono essere visualizzati in tempo reale sul sito SWPC del NOAA nella sezione "Products and Data" al seguente link: <https://www.swpc.noaa.gov/products-and-data>, selezionando i singoli report, oppure visualizzare in modo sintetico i dati maggiormente significativi selezionando l'opzione "Radio" nella sezione "Dashboard" sempre dello stesso sito al link: <https://www.swpc.noaa.gov/communities/radio-communications> :



Link Utili:

- <http://www.sidc.be/silso/datafiles>
- <http://www.hamqsl.com/solar.html>
- <https://www.swpc.noaa.gov/>
- <https://prop.kc2g.com/>
- <http://www.propquest.co.uk/graphs.php>
- <http://ionos.ingv.it/Roma/latest.html>

Bibliografia

- K. Davies, *Ionospheric Radio Propagation — National Bureau of Standards Monograph 80* Washington, DC: U.S. Government Printing Office, April 1, 1965.
- GERINI Yannick, *Shortwave propagation and communications systems*
- E. A. Laport, *Radio Antenna Engineering* (New York: McGraw-Hill Book Co, 1952).
- Donald E. Kerr, *Propagation of Short Radio Waves* (New York: McGraw-Hill Book Co, 1951).
- Anita Aikio, *Ionosphere and Radar measurements - Dept. Physics, University of Oulu, Finland*
- Luigi Perna – “ Ionospheric plasma response to the anomalous minimum of the solar cycle 23/24: modeling and comparison with IRI-2012” – 2017 - Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Dottorato di ricerca in Geofisica
- Carlo Scotto, *Radiopropagazione ionosferica HF*
- Cesidio Bianchi, Antonio Meloni, *Natural and man-made terrestrial electromagnetic noise - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia,*
- John Devoldere ON4UN - *Low-Band Dxing*
- Paul L Herrman NONBH, *Understanding Propagation*
- Marcel H. De Canck, ON5AU - *Radio Wave Propagation*
- ARRL *Antenna Book 18th Edition* (published by ARRL Newington CT, 1998)