

5. Risultati e conclusioni

5.1 Definizione dell'instabilità ionosferica particolare

Con instabilità ionosferica particolare, s'intende un calo dell'intensità del segnale radio, riconducibile a alterazioni della conduttività ionosferica tali da provocare una, nel tempo indefinita interruzione delle comunicazioni fra stazioni situati a una determinata distanza.

Fatto interessante: sul ricevitore, durante il disturbo, i segnali della comunicazione interrotta vengono sostituiti **solo** da segnali provenienti da stazioni più distanti. Ciò fa supporre un calo della frequenza limite, per il resto confermato dalla possibilità di ripristinare nella maggior parte dei casi, la comunicazione su frequenza inferiore. Magari con segnali più deboli, ma sufficienti a garantire la comprensibilità. Ad esempio in Ravenna, in banda 40 m, in presenza d'instabilità compaiono forti stazioni telegrafiche e telefoniche siciliane e spagnole, normalmente assenti.

Nella formulazione della definizione si è badato a escludere instabilità particolari come il fenomeno: Mögel-Dellinger, durante il quale i ricevitori sintonizzati su bande inferiori ai 20 m ammutoliscono per minuti se non per ore. Oppure evanescenze periodiche che rendono la comunicazione difficoltosa, ma non impossibile.

5.2 Dimostrazione dell'esistenza dell'instabilità ionosferica particolare

Si considerino due stazioni radio sulla terra, site a corta distanza, in perfetto stato di funzionamento e in collegamento punto/punto in onde corte, senza riflessioni di sorta. Si ipotizzi che una delle due stazioni emetta una portante non modulata, costante in frequenza, fase e ampiezza. Si può tranquillamente dimostrare che l'intensità di campo della componente terrestre dell'onda misurata alla stazione ricevente, astraendo da deboli e trascurabili instabilità, è stabile nel tempo.

Si consideri ora l'instabilità dei segnali di Ulm in Ravenna. Sapendo che il valore efficace dell'intensità del campo elettrico misurato in un certo punto dello spazio è proporzionale a quello della fonte. Che la fonte non può essere che la ionosfera, essendo l'onda di terra in Ravenna sicuramente estinta. Si conclude che il valore efficace del campo in Ravenna è generato dalla componente ionosferica dell'onda incidente sull'antenna. Si consideri altresì che la tensione misurata ai capi di un'antenna risonante su una data frequenza è direttamente proporzionale alla **metà** dell'intensità di campo in quel luogo. Si conclude che anche il valore della tensione misurata ai capi dell'antenna dipende dal campo generato dalla componente ionosferica dell'onda e i percorsi dall'antenna di trasmissione alla ionosfera e dalla ionosfera all'antenna di ricezione, escludendo il percorso interno alla ionosfera. Sapendo che la propagazione dell'onda elettromagnetica è retta dalla costante di trasmissione Γ e in particolare dall'attenuazione: $A = \alpha l$, funzione della distanza, ma **non** del tempo, fatti salvi particolari, trascurabili fenomeni atmosferici e troposferici, si può concludere che lungo queste tratte non sussistono motivi per variazioni continue o discontinue dell'intensità efficace del campo elettrico al di fuori del calo esponenziale per attenuazione.

Stante questa situazione si può affermare che:

1. L'origine dell'instabilità dell'intensità di campo di un segnale di origine ionosferica in un dato luogo e in dato tempo deve ricercarsi all'interno della ionosfera e in particolare nell'instabilità temporale dei fenomeni di ionizzazione e ricombinazione preposti alla rifrazione dell'onda
2. Per il principio di causalità deve esistere una relazione fra instabilità temporale dei fenomeni di ionizzazione e ricombinazione, visti come causa e instabilità della frequenza limite e dell'intensità del campo elettrico alla ricezione, viste come effetto
3. Quale relazione fra causa e effetto può ipotizzarsi la costante di trasmissione Γ della ionosfera che da sola funzione dello spazio si trasforma in funzione di spazio e tempo

Dimostrato che l'instabilità particolare dei segnali deve essere di origine ionosferica, non avendo la possibilità di accedere a ionosonde o a dati satellitari, si è fatto di necessità virtù applicando l'analisi grafica e statistica ai valori d'intensità dei segnali misurati e catalogati in Ravenna.

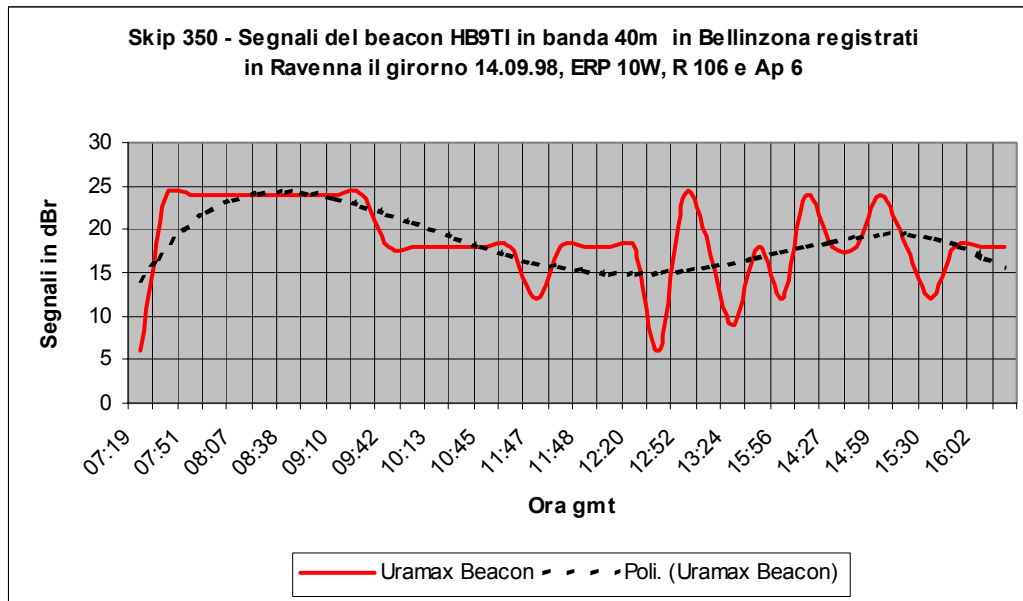
Le prime rappresentazioni grafiche dei segnali e del disturbo magnetico in funzione del tempo assunti per semplificazione continui, sebbene istogrammi, misero in luce un'inspiegabile quanto anomala "modulazione" aperiodica della "differenza di fase" fra segnale al bocchettone del ricevitore U_{rx} e disturbo magnetico giornaliero A misurato a Kiel.

Quest'osservazione indusse a formulare l'ipotesi che il segnale fosse una funzione di più variabili e che per venire a capo bisognasse in qualche modo scindere il problema in instabilità congenita, instabilità da disturbi geofisici e instabilità da fenomeni solari.

5.2.1 Instabilità congenita

Con instabilità congenita s'intende un genere d'instabilità dipendente unicamente dai processi di ionizzazione e ricombinazione della ionosfera in periodo d'attività solare e geomagnetica minima e costante.

Condizione iniziale per dimostrare l'esistenza dell'instabilità congenita è l'eliminazione o almeno riduzione degli influssi che potrebbero falsare il rilevamento. In pratica misurare i segnali a intervalli regolari (esempio ogni 10 minuti) in condizione di: $k < 4$, $R \geq 80$ e assenza di flares.



Il grafico del 9 settembre 1998, giorno magneticamente e solarmente tranquillo, riporta i segnali della stazione beacon HB9TC di Bellinzona con una ERP di 10 W, misurati in Ravenna sulla frequenza di 7005 MHz. Analizzandolo si notano tre intervalli significativi. Il primo dal sorgere del sole fino a mezza mattinata, con segnali in costante e rapido aumento per prevalente forte ionizzazione degli strati superiori, con tendenza a stabilizzarsi. Il secondo, da mezza mattinata al primo pomeriggio, con calo dei segnali di 10...20 dB per la presenza dello strato D. Il terzo, dal primo pomeriggio al tardo pomeriggio con segnali in crescita, ma fortemente instabili, per prevalente ricombinazione e scomparsa dello strato D.

Ne consegue che durante le prime 3...5 ore dalla levata del sole la foF2 crescerà rapidamente tanto da raggiungere in situazione di tranquillità un massimo, attorno a cui pendolerà in modo più o meno continuo fino al tramonto. Anche se i giorni con forti discontinuità da disturbo magnetico e solare, non sono rari.

La crescente illuminazione solare darà finalmente vita agli strati inferiori. In particolare il famoso strato D la cui particolare densità elettronica, insufficiente per una riflessione totale delle frequenze superiori a 3 MHz, incrementando la probabilità di collisione fra elettroni genera forte attenuazione e prerifrazione dei segnali nelle bande basse (160, 80 e 40 m). Spostandosi a ritroso il punto di ricaduta sulla terra, la portata delle trasmissioni si riduce, come dimostra il sottostante estratto dalla statistica dei collegamenti del 1998 in Ravenna in banda 40 m, con circa 5 Watt ERP:

Ora solare di Ravenna	Tasso di Collegamento specifico del 1998
11.48	18
12.48	5
13.48	6
14.48	15
15.48	18
16.48	17
17.48	34
18.48	13

L'elenco si riferisce a collegamenti con stazioni del centro e nord Europa. Durante il mezzogiorno solare, in concomitanza con il massimo spessore dello strato D, il tasso di collegamento specifico (collegamenti/ora) è al minimo. Raggiunge un massimo attorno alle cinque della sera, dopo la dissoluzione dello strato D e con gli strati F1 e F2 ancora a bassa quota in procinto di fondersi in un unico strato: **F**, a quota superiore (fenomeno della: "linea grigia"). Per il resto si osserva che durante il minimo aumenta la probabilità di collegare stazioni vicine.

Al di là di queste considerazioni si richiama la forte instabilità pomeridiana. Escludendo fenomeni di propagazione plurima che causano fading o evanescenza (variazioni dell'intensità del segnale da somma vettoriale di segnali sfasati), la stabilità della riflessione non può dipendere che dalla costanza della densità elettronica e dalle dimensioni dello strato rifrangente. Purtroppo l'irregolarità statistica del processo di ionizzazione e ricombinazione provocano irregolari variazioni della densità elettronica, quindi della conduttività ionosferica, trasformando la costante di trasmissione all'interno della ionosfera in una variabile non solo del luogo, ma anche del tempo, confermando in tal modo l'ipotesi dell'esistenza di un'instabilità congenita come uno dei motivi primari della variazione dei segnali in Ravenna. Si può pertanto concludere:

Visto l'andamento del grafico dell'intensità dei segnali in funzione del tempo del 9 settembre 1999. Considerato che esso è stato ottenuto in condizioni geomagnetiche e solari favorevoli. Si conclude che esiste un'instabilità congenita della ionosfera.

La misura dei segnali del beacon di Bellinzona in Ravenna è stata più volte ripetuta con ERP inferiori, sempre ottenendo andamenti simili. Solo alcuni anni più tardi, comparando i grafici della foF2 delle 18t00 misurati dalla ionosonda di Roma con i nostri grafici, si ebbe la conferma della correttezza dell'analisi e delle conclusioni.

5.2.2 Instabilità da variazioni geomagnetiche e solari

L'irregolare modulazione della differenza di fase evidenziata dal grafico temporale dei segnali e del disturbo magnetico indusse a ipotizzare che i segnali dipendessero da più variabili

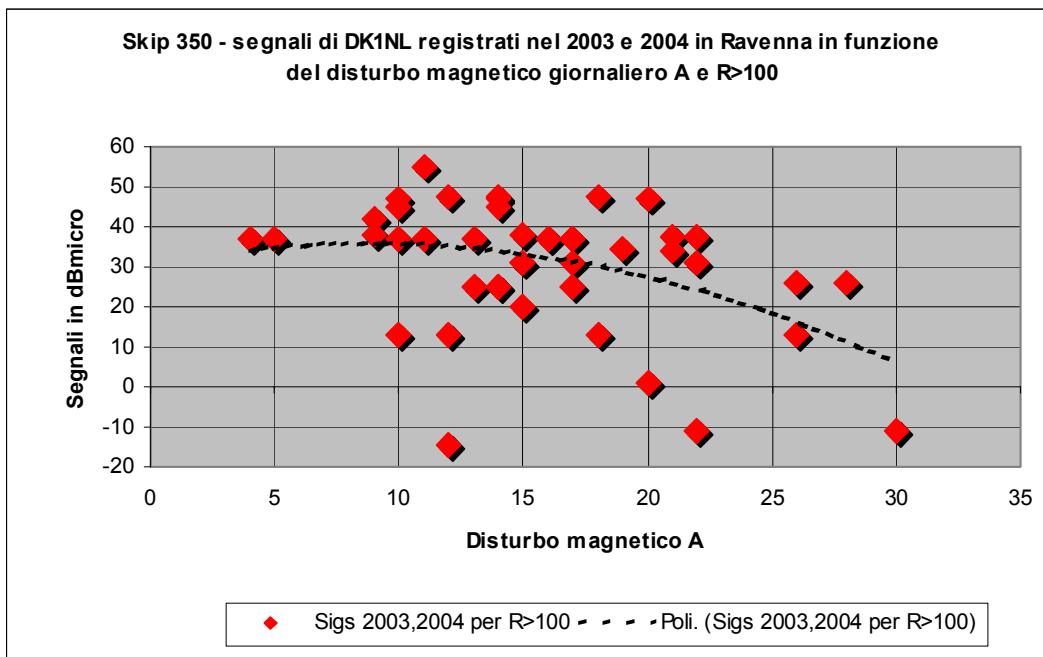
5.2.2.2 Instabilità da disturbo magnetico

La prima significativa indicazione in questo senso la si ottenne correlando la serie di segnali di Bellinzona dal 28 agosto al 28 settembre 98 ricevuti sulla frequenza di 7005 kHz con quella dei disturbi magnetici planetari: **Ap**, ottenendo un valore di - **0,05**. Valore indicante una possibile, ma non sicura indipendenza delle due serie comparate, poi confermata dall'apparire di una forte dispersione nel grafico a punti. Un primo tentativo di tracciare una linea di tendenza non diede risultati apprezzabili.

Il poco rallegrante risultato fece ipotizzare che i segnali fossero una funzione di due o più variabili: disturbo magnetico, macchie solari, flares e altro a noi sconosciuto. Per cui si tentò d'escludere almeno l'influsso delle macchie solari non considerando i segnali dei giorni con **R** \geq **80**, valore di riferimento di cui si dirà nel prossimo capitolo.

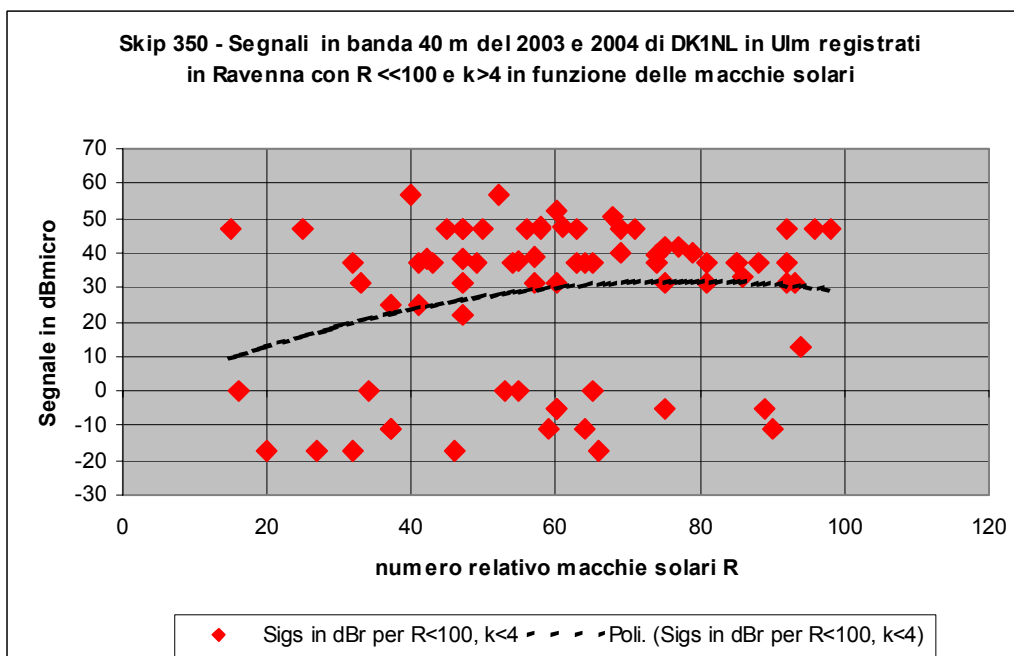
Il grafico rappresenta la dispersione dei segnali della stazione DK1NL di Ulm (distanza: circa 550 km di cerchio massimo) delle 07ut30, in funzione dei disturbi magnetici giornalieri di Kiel degli anni 2003 e 2004 e la linea di tendenza la continuità della dipendenza del segnale dal disturbo magnetico.

Visto l'andamento della linea di tendenza del grafico di dispersione dei segnali in banda 40 m, in funzione del disturbo geomagnetico del periodo 2003 e 2004. Considerato che esso è stato ottenuto in regime di R >100, si può concludere che esiste una forte instabilità da disturbo geomagnetico.



5.2.2.1 Instabilità da macchie solari

Ripetendo l'esercizio precedente, correlando segnali e macchie solari con il numero relativo di macchie solari **R** per **k < 4** e **A < 10** e rappresentando graficamente si ottenne: **0,4**. Valore indicante possibile indipendenza.



Il grafico rappresenta la dispersione degli stessi segnali della stazione DK1NL, ma in funzione del numero relativo di macchie solari **R**. La linea di tendenza oltre **R > 80**, si appiattisce lasciando intendere che oltre questo valore l'influsso diventa trascurabile. Osservazione confermata dalla misura della foF2 di Roma delle 18lt00 della ionosonda nel periodo 1976...1986.

Si è però anche osservato che il solo **R** sembra contribuire in modo minore all'instabilità. Valgono in tal senso le osservazioni di Ravenna del 2004 e inizio 2005: anni di minimo solare con **R** sovente attorno a 10...20. In giorni a debole **R** e **Ap** i segnali delle 07ut30 raggiunsero lo stesso i massimi possibili di **40...45 dBμ**. Al contrario con **R** debole e **A** in aumento nella buona parte dei casi il collegamento venne interrotto o non fu possibile. Sulla base di queste considerazioni, si può concludere che:

Visto l'andamento della linea di tendenza del grafico di dispersione degli anni 2003 e 2004. Considerato che essa è stata ottenuta in regime magnetico particolarmente tranquillo. Si può concludere che per $R \leq 100$ esiste la probabilità che insorga una certa instabilità, specialmente se combinata con un disturbo magnetico di piccola, media intensità.

5.2.2.3 Instabilità da flares

L'apparire sul sole di speciali eruzioni dette flares che (senza entrare nel merito) lanciano enormi quantità di particelle, radiazioni X e campi magnetici verso lo spazio investendo in particolare la terra, provocando fra l'altro repentini aumenti della densità elettronica delle coltri ionosferiche. L'attivazione di flares è rivelata da repentini aumenti della velocità del vento e del flusso solare. Quest'ultimo misurato giornalmente sulla frequenza di 2800 MHz dall'osservatorio di Boulder in Colorado.

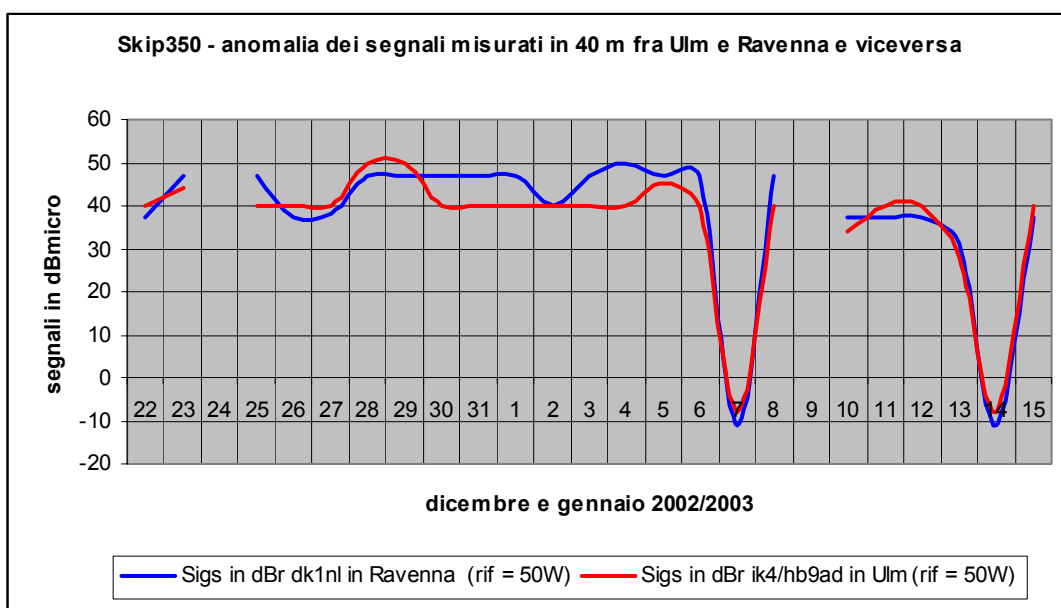
I flares sono classificati internazionalmente in 4 classi energetiche: B, C, M e X, di cui la classe B è la più debole. La classificazione è ottenuta misurando l'energia specifica emessa, in $\mu W/m^2$.

Un esempio di disturbo generato dall'apparire di un flare di tipo M è stato rilevato in Ravenna il 9 gennaio 2005 attorno alle 10ut00 durante un collegamento con la stazione HB9AFI di Renans (Svizzera). Nell'arco di un quarto d'ora, per ben due volte di seguito i segnali aumentarono sino a **40 dBμ** e scomparvero, interrompendo in fine la comunicazione.

I flares rientrano in quella serie di variabili che generano sicuramente instabilità ionosferica, ma che per carenza d'informazione riusciamo difficilmente a analizzare. In questo senso prevediamo per il futuro uno studio più approfondito dei flares per meglio conoscerli e meglio valutare il loro apporto all'instabilità.

5.3 Una strana anomalia

L'analisi dell'irregolare modulazione della differenza di fase evidenziata dal grafico temporale dei segnali e del disturbo magnetico, di cui si è detto attrasse l'attenzione su un comportamento causale anomalo: all'aumentare del disturbo magnetico seguiva un calo ritardato del segnale di qualche giorno, ma dopo una breve sequenza di due o più picchi magnetici il calo dei segnali era immediato e tale rimaneva per un certo periodo.



Anomalia difficile da spiegare. Tanto che resta il dubbio che essa sia solo il frutto dell'errore dei nostri rudimentali strumenti di misura. Infatti, se il ritardo al limite potrebbe spiegarsi con l'esistenza di una soglia energetica minima superata la quale finalmente s'innesca l'instabilità, la scomparsa del ritardo rimane insoluta. Escludendo a priori la messa in discussione del principio di causalità, non rimane che concludere che se dimostrata, l'anomalia è solo concepibile all'interno di un modello di ionosfera più complesso. Comunque sia, anche questo fenomeno sarà oggetto di una futura analisi che si avvarrà della preziosa banca dati del magnetometro di Bellinzona che si trova (guarda caso) sotto lo spicchio ionosferico che rifrange i segnali in transito fra Ulm e Ravenna e viceversa.

5.4 Conclusioni sull'instabilità ionosferica particolare

Prima di chiudere è bene fare qualche considerazione. Inibendo secondo necessità l'influsso delle macchie solari e del disturbo geomagnetico la dispersione è nettamente diminuita, ma non scomparsa. Segno evidente che esistono altre variabili non inibite. Una di queste sono sicuramente i flares spesso contemporaneamente attivi in gruppo.

La ionosfera è un fenomeno parte di una ben più vasta e complessa struttura astrofisica. Semplificare la ionosfera ai soli fenomeni antitetici della ionizzazione e ricombinazione è abbastanza riduttivo.

L'instabilità ad esempio, può essere metaforicamente immaginata come il lento, progressivo rovinare di un vecchio muricciolo a secco. Con sussulti e screpolature che si concludono in un rovinoso crollo in mezzo a un gran polverone. Processo che non dipende dalla sola forza di gravità, ma dalla solidità dei materiali, dall'usura, dalle intemperie, dalla stabilità del terreno, da colpi, da fenomeni sismici e quant'altro che nulla hanno a vedere con la statica iniziale. Che nessuna formula matematica è in grado di rappresentare.

I sussulti e le screpolature del muro in radiocomunicazione rappresentano le variazioni sempre più profonde, sempre più veloci dei segnali. Il crollo del muro in un polverone: l'interruzione della comunicazione e la comparsa di altre stazioni.

Che le cose vadano effettivamente in questa direzione lo testimonia il fatto che fino ad ora non è stato possibile trovare una formula per calcolare la foF2. Che le previsioni si basano su dati empirici: la misura della densità elettronica fatta da satelliti non geostazionari oppure indici, come l'indice T dell'australiana IPS, calcolati sulla base dei valori statistici di foF2 durante più cicli solari.

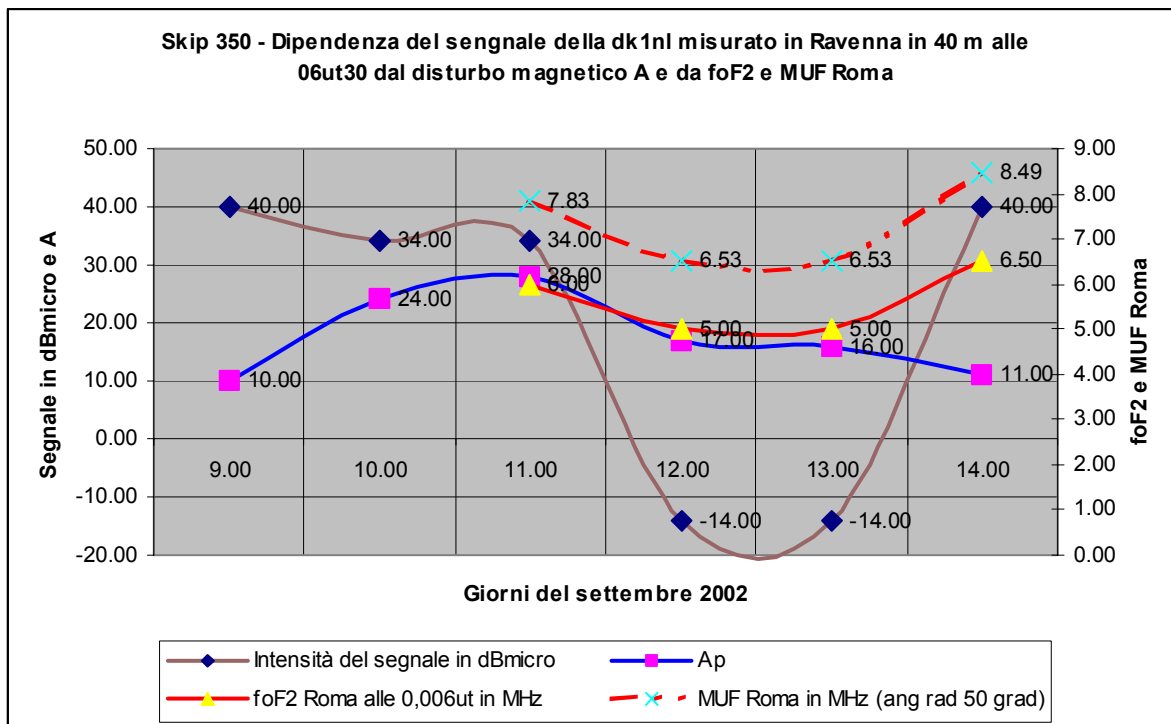
Si potrà obiettare che la ionosfera non è un muro che si sgretola. Che gli ioni e gli elettroni non sono pietre e cemento. Tutto vero! Rimane il fatto che ogni radio operatore delle onde corte può confermare quanta fatica costi garantire la sicurezza permanente delle comunicazioni con una ionosfera dai tratti bizzarri.

5.5 Fenomeni particolari di propagazione

Il tema dell'instabilità ionosferica potrebbe concludersi qui. Volendo però ampliare la panoramica della problematica si richiamano alcuni fenomeni particolari che in un modo o nell'altro interessano lo spettro elettromagnetico. I Whistler: strani sibili naturali in onde lunghe. L'effetto Luxembourg: la rimodulazione ionosferica di due portanti vicine in frequenza. L'aurora boreale. L'effetto Mögel-Dellinger: l'aumento anomalo della densità elettronica degli strati ionosferici. La superpropagazione: periodo di segnali forti e stabili. La propagazione unilaterale da anisotropia. Tutti fenomeni ionosferici spettacolari croce e delizia dei radio-operatori in onde corte di tutte le latitudini. Tralasciando l'aurora boreale: fenomeno tipico delle alte latitudini. I sibili: limitati alle onde lunghe. L'effetto Luxembourg che interessa principalmente la radiodiffusione in onde corte a alta potenza. Ci si occuperà di quei fenomeni che interessano le stazioni con potenza inferiore a 1 kW ERP.

5.5.1 La superpropagazione

Alla fine di forti disturbi solari e geomagnetici la ionosfera si tranquillizza e la propagazione sub-tangenziale a basso guadagno ionosferico, si stabilizza. Scompare quella specie di fastidioso alone di fondo, (una specie di "nebbiolina" elettromagnetica). I segnali telegrafici diventano squillanti, forti e stabili. La scala internazionale da 1 a 9 della qualità di propagazione, che valuta la variazione dell'intensità di campo media nella banda di frequenza utile alla trasmissione limitata da MUF e LUF, attribuisce a questo fenomeno la cifra 9 e la denominazione: **Superpropagazione**.



La superpropagazione è aperiodica. Compare dopo qualche giorno dalla fine di forti tempeste magnetiche e scompare dopo qualche giorno lasciando il posto all'instabilità, così come l'aria tersa dopo un forte temporale scompare lasciando il posto alla foschia. Fenomeno più volte osservato in Ravenna. E sempre qualche giorno dopo la fine di forti disturbi magnetici!

5.5.2 L'effetto Mögel Dellinger

Le particelle e le radiazioni generate e lanciate nello spazio dai flares, in particolare gli X-flares, causano un rapido e forte aumento della ionizzazione degli strati ionosferici e una forte perdita di trasparenza. L'onda incidente nello strato mette in oscillazione gli elettroni liberi lungo orbite ellittiche lunghissime, proporzionalmente alla lunghezza d'onda. L'aumento della densità elettronica significa aumento della probabilità di collisione fra elettroni, dissipazione dell'energia termica generata dall'urto, e fortissima attenuazione del segnale in transito.

L'effetto interessa principalmente le bande dei 160, 80 e 40 m che per la lunghezza d'onda spingono gli elettroni liberi su orbite lunghissime con forte dispendio d'energia cinetica. Per lunghezze d'onda sotto i 40 m le orbite si raccorciano e il fenomeno tende a divenire insignificante.

Fatto curioso di questo fenomeno spesso constatato in Ravenna durante il periodo estivo, è (oltre l'interruzione delle comunicazioni) la scomparsa improvvisa del fruscio cosmico sui ricevitori. Ciò ha indotto schiere di radio-operatori a controllare che le antenne non fossero sparite, che le discese d'antenna non fossero tranciate e perfino a smontare il ricevitore creduto guasto.