

METEO E PROPAGAZIONE

Influenza dei fenomeni meteorologici sulla propagazione

Introduzione

Questa ricerca ha lo scopo di mettere in relazione la propagazione delle onde radio con la situazione meteorologica, per cercare di capire quali possono essere le correlazioni tra la meteorologia della troposfera e gli strati superiori dell'Atmosfera terrestre. Come sappiamo le radio onde hanno comportamenti completamente differenti al variare della frequenza, pertanto dobbiamo tenerne conto, e rapportare il tutto alla frequenza dell'onda riflessa. Tutti i fenomeni meteorologici avvengono nella troposfera, quindi ad altezze fino a circa 10 Km (zona temperata), la troposfera e ionosfera non sono due cose completamente distinte ma dinamicamente legate, inoltre le onde radio che partono dall'antenna trasmittente devono attraversare entrambi gli strati quindi una certa relazione e influenza ci deve pur essere, qualsiasi sia la frequenza dell'onda incidente. Inoltre, studi recenti sembrano confermare l'influenza che onde gravitazionali atmosferiche generate da fenomeni troposferici, possono avere sull'atmosfera e quindi anche sulla radio propagazione.

Fisica dell'Atmosfera e della Ionosfera

L'atmosfera terrestre ha dimensioni limitate, questo strato esterno di vapor d'acqua e gas che avvolge il nostro pianeta ha uno spessore, se paragonato alle dimensioni fisiche della terra, molto sottile, pertanto si può dedurre come l'equilibrio dell'A. sia delicato e possa essere influenzato dalla terra sottostante, dall'emissione d'energia dal sole e quindi dalla magnetosfera. Temperatura, pressione, flusso di radiazioni, composizione, variano notevolmente con la quota, però si possono identificare zone all'interno dell'atmosfera, dove questi valori variano molto lentamente o rimangono fissi, sono le cosiddette "sfere", cioè aree con caratteristiche quasi costanti, separate da aree di discontinuità dove i valori subiscono una brusca variazione, si tratta di zone molto sottili chiamate "pause". La struttura e la suddivisione delle varie zone è riportata nella fig.1A, mentre nella figura 1B è riportata la concentrazione di elettroni e di ioni per centimetro cubo in base all'altezza.

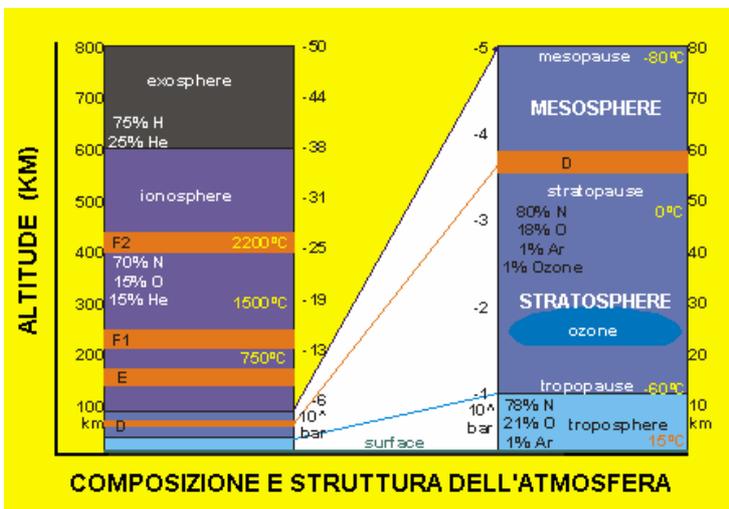


Fig.1A

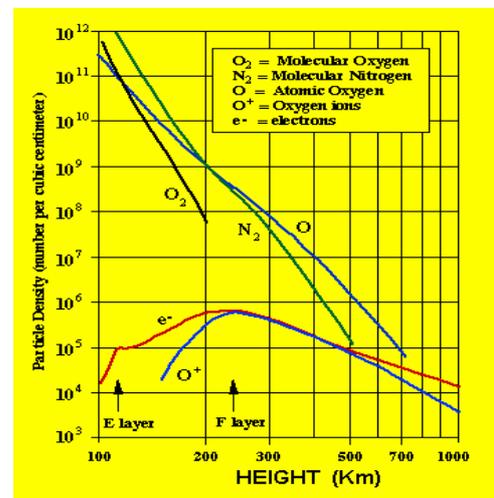


Fig.1B

Ionosfera

La ionosfera è la parte superiore dell'atmosfera della terra e si estende da circa 60 a 1000 km di quota, la presenza d'elevate quantità di ioni e d'elettroni liberi influenza la propagazione delle onde radio che l'attraversano. Ioni ed elettroni liberi sono prodotti dalle molecole di gas scisse dai raggi solari. Le fonti di ionizzazione sono le seguenti:

- Radiazione solare, raggi X e ultravioletti UV
- Raggi cosmici (GCR)
- particelle energetiche provenienti dal sole e dalle fasce di Van Allen.
- nell'atmosfera più bassa, radiazione radioattiva dalle rocce.
- Ablazione meteorica nella regione E

I raggi UV ed i raggi X forniscono la fonte più importante di fotoionizzazione sopra i 60 km di quota, fino alle quote più alte, regione F1 e F2 attorno ai 400 km d'altezza.

La parte penetrante profonda dei raggi UV (bassa lunghezza d'onda, inferiore a 175 nano- metri) e dei raggi X, incontra lo strato E a 90-140kms e per concludere, lo strato D a 70-90km.

Al di sopra dei 100 Km. la ionizzazione è causata dai raggi X solari, dove elettroni e ioni vengono separati con il risultato di una miscela d'elettroni, ioni e particelle di gas neutro chiamato Plasma.

La ionizzazione rende elettricamente conduttiva l'aria, con la conseguenza che all'interno della Ionosfera possono scorrere delle correnti elettriche, e le radio onde possono essere riflesse o assorbite.

Durante le ore notturne, rimane una ionizzazione residua oltre che una leggera fonte di continua ionizzazione causata dalla dispersione dal lato illuminato della terra, dalla radiazione stellare (che interessa la regione E) e dai raggi cosmici galattici (che interessano la regione D).

Troposfera

La troposfera è lo strato più basso dell'atmosfera terrestre, essa si estende dalla superficie della terra fino a circa 10 Km di quota nelle zone temperate, lo spessore aumenta all'equatore e diminuisce ai poli a causa delle differenze di temperatura (5-6 Km. sopra i poli, 15-18 Km sopra l'equatore), l'aria più calda per effetto della dilatazione occupa uno spazio maggiore rispetto all'aria fredda.

La composizione chimica della Troposfera è la seguente:

- -Azoto 75,5%
- -Ossigeno 23,1%
- -Anidride carbonica 0,046%
- -Altri Gas 0,074%
- -Vapore acqueo indeterminato

La parola Troposfera deriva dal greco "Tropos" che significa variazione, proprio perché all'interno di questa sfera troviamo i maggiori valori di pressione e densità, nonché le più grandi variazioni.

All'interno della T. accadono tutti i fenomeni meteorologici, come nuvole, precipitazioni, fulmini e la temperatura diminuisce con l'aumentare della quota in ragione di circa 6 °C ogni chilometro, in essa è contenuto il 90% dell'atmosfera terrestre e il 99% del vapore acqueo; è formata per il 23% di ossigeno molecolare (O₂), per il 75% di azoto molecolare (N₂) e sono presenti in quantità del tutto trascurabile (1-2%) anche altri gas.

Effetti meteorologici

Le più recenti ricerche scientifiche sembrano dimostrare un'interazione tra la ionosfera e la bassa atmosfera.

L'aeronomia e la dinamica dello strato assorbente D, gli anomali assorbimenti delle radio onde nella ionosfera, la formazione e la struttura dell'Es, le correnti ionosferiche, nonché la struttura della regione F, dovrebbero essere studiate in correlazione con la situazione termodinamica degli strati ionosferici inferiori e quindi anche in relazione a quanto accade nella troposfera.

Questo è dovuto alla propagazione dalla troposfera e dalla stratosfera verso la ionosfera di un largo spettro di onde interne atmosferiche, acustiche e gravitazionali oltre che da possibili influenze gravitazionali della luna (maree).

Movimento e circolazione dei venti, turbolenze e correnti non avvengono solo all'interno della troposfera ma accadono fino all'altezza della ionosfera.

La forza di interazione dipende dalle caratteristiche della circolazione atmosferica, dall'intensità e dall'origine delle onde.

La teoria dell'influenza dei venti ionosferici, delle onde gravitazionali associata all'azione delle condizioni meteorologiche nella troposfera dovrebbe avere quindi una certa influenza sugli strati ionosferici e quindi influenzare anche la propagazione delle radio onde nella ionosfera.

La ionosfera e la troposfera sono legate sia dinamicamente sia chimicamente.

Alle latitudini basse e centrali nel lato illuminato della terra, per esempio, i venti neutri termosferici spostano il plasma ionosferico attraverso le linee del campo geomagnetico, creando una dinamo atmosferica che genera tutta una serie di correnti ionosferiche e l'electrojet equatoriale, si forma una forte corrente dal lato illuminato verso il lato oscuro che entra nella regione E, lungo l'Equatore geomagnetico.

TIDs, Travelling Ionospheric Disturbances (Irregolarità mobili)

Si tratta di strutture ad alta densità elettronica che si propagano orizzontalmente all'interno della ionosfera ad una velocità da 5 a 10 Km/min. con una ben definita direzione.

Essi hanno origine dalla zona aurorale a seguito di eventi solari o per effetto di onde gravitazionali causate da eventi meteorologici.

Questi disturbi ionosferici possono avere effetti negativi sulle riflessioni dei segnali radio, soprattutto sono causa di evanescenza poiché possono formare delle regioni ionosferiche inclinate (come da figura 3) causa di percorsi multipli che generano appunto l'evanescenza del segnale, inoltre TIDs causano la variazione di fase, ampiezza, polarizzazione e angolo di arrivo dell'onda elettromagnetica.

Si possono distinguere due diversi tipi di disturbi ionosferici mobili:

-TIDs su larga scala, aventi 1000 Km di lunghezza d'onda, che si muovono generalmente dai poli verso l'equatore e generati dall'attività aurorale

-TIDs su media scala, aventi qualche centinaia di Km di lunghezza d'onda e generati da fenomeni temporaleschi e onde gravitazionali atmosferiche.

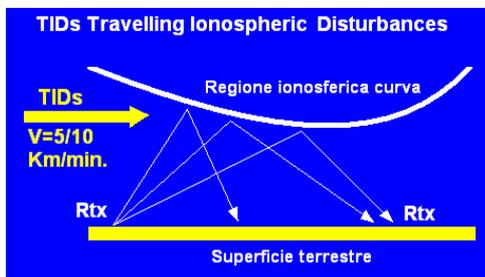


Fig.2

Venti ionosferici e onde gravitazionali

Le onde gravitazionali atmosferiche (da non confondersi con le onde gravitazionali legate alla teoria della relatività di Einstein) giocano un ruolo importante nella dinamica della media e alta atmosfera.

Propagandosi attraverso la termosfera e interagendo con il plasma ionosferico producono disturbi ionosferici, e sono in grado di interagire con il campo magnetico fino al livello dello strato F, influenzandone la concentrazione ionica, le onde gravitazionali che si

propagano dagli strati inferiori, creano, infatti, un flusso di ioni che influenzano l'economia del processo di ionizzazione che consiste nell'acquisire o perdere degli elettroni.

Tale influenza sembra più marcata nella formazione dello strato F2 notturno, dove le o.g. contribuirebbero a fornire una piccola ma continua sorgente di nuova ionizzazione, contribuendo al mantenimento della ionizzazione residua notturna.

Negativo è invece l'effetto che le o.g. hanno sulla regione D, poiché possono aumentarne l'assorbimento soprattutto per le frequenze più basse dello spettro Hf e ancora di più per le onde medie.

Le o.g. sono onde di pressione neutra a gran lunghezza d'onda (con un periodo T variabile da 10 a 180 Minuti) che si estendono all'interno della termosfera e il meccanismo che genera l'onda è un'oscillazione causata dallo spostamento di una cella d'aria che è ricollocata nella sua posizione iniziale per effetto della gravità e i movimenti che le generano hanno varia natura, nella bassa atmosfera sono attivate da diversi fenomeni meteorologici come formazioni temporalesche, azione dei venti sulla superficie terrestre, formazioni cicloniche e instabilità causate dal jet stream, mentre alle alte latitudini le o.g. si localizzano maggiormente nell'alta atmosfera e hanno cause associate al riscaldamento per effetto joule, alle forze di Lorentz, e alle precipitazioni particellari legate al campo magnetico e provenienti dal sole.

Il differente livello d'insolazione tra i due emisferi determina un forte squilibrio termico che genera una vasta circolazione di correnti nella bassa ionosfera, nell'emisfero estivo, quindi più caldo si crea una corrente ascensionale, compensata da una corrente in direzione opposta nell'emisfero freddo, è questa la dinamica che genera i forti venti ionosferici.

Queste oscillazioni alle latitudini temperate, avvengono nella bassa atmosfera (limiti della troposfera) e conseguentemente si propagano all'interno della Mesopausa (circa 90 chilometri di quota), fino alla termosfera, coinvolgendo in pieno la regione E.

Perturbazioni temporalesche, fulmini, sprites, cicloni, tempeste e forti perturbazioni meteorologiche, sono sorgenti di onde gravitazionali che creano perturbazioni agli strati D ed E e perfino alla regione F.

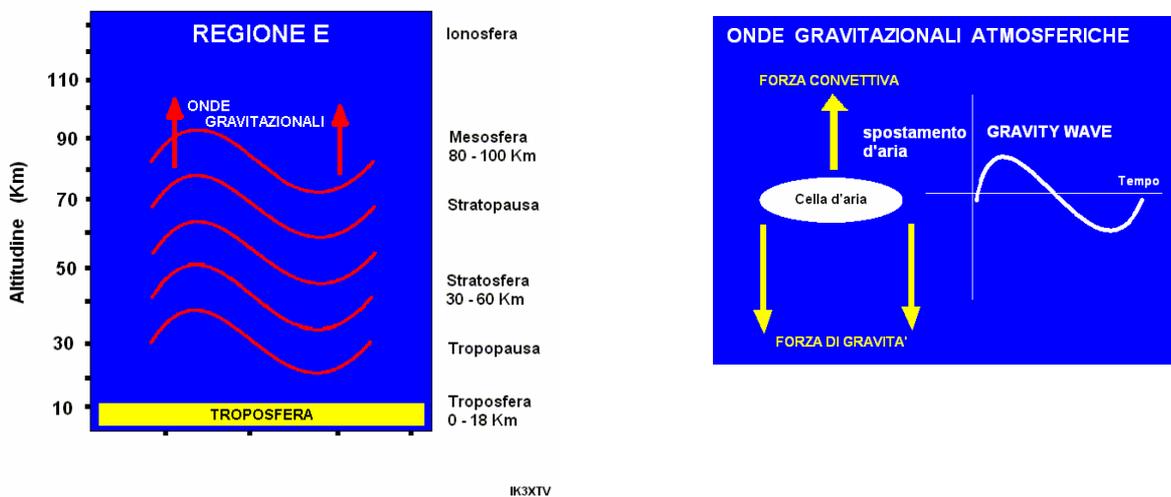


Fig.3 Le onde gravitazionali atmosferiche sono un importante elemento di correlazione tra gli strati bassi dell'Atmosfera e la Ionosfera che possono influenzare il comportamento di quest'ultima e quindi della radio propagazione.

La figura mostra il principio di base, cioè l'oscillazione di una particella d'aria che genera l'onda gravitazionale.

Essa si propagano sia verticalmente che orizzontalmente e trasportano attivamente l'energia e la quantità di moto dalla troposfera all'atmosfera centrale e superiore.

Jet stream (Correnti a getto)

Si tratta di grandi correnti d'aria di direzione prevalentemente occidentale che corrono attorno al pianeta a quote attorno ai 100 chilometri e con velocità che possono superare i 100 metri/sec.

All'interno di ciascuna corrente si trovano forti turbolenze di maggiore forza e velocità che a causa degli attriti con gli strati inferiori hanno ripercussioni sulla meteorologia, dando origine a zone di alta e bassa pressione.

Queste forti correnti avvengono nella mesosfera che è uno strato molto dinamico, dove venti, onde atmosferiche e turbolenze, giocano un ruolo molto importante.

Questi processi influenzano sia gli strati che si trovano sopra che quelli sotto.

Nella cartina è riportata una mappa meteorologica raffigurante la situazione del jet stream sull'Europa riferita al 04/09/2003.

È probabile che alcuni eventi propagativi quali per esempio le aperture di E sporadico, siano influenzati dall'intensità e dai movimenti di questi venti stratosferici.

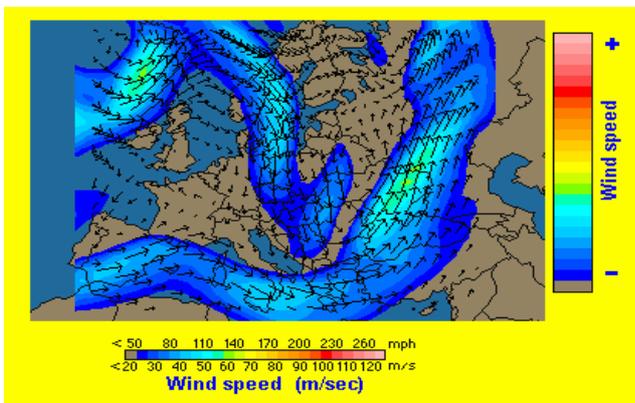


Fig.4 Mappa relativa alle condizioni del jet stream sull'Europa registrate alle 06.00 del 04/09/2003, la carta viene riportata a titolo di esempio.

Propagazione HF

La propagazione delle onde HF avviene prevalentemente all'interno della Ionosfera terrestre, pertanto la situazione meteorologica non e' l'elemento più importante poiché le riflessioni dei segnali sono dovute a strati che si trovano relativamente in alto (soprattutto per riflessioni che accadono nella regione F) e quindi distanti dalla Troposfera cioè dall'area dove si sviluppano i fenomeni meteorologici. Tuttavia, i treni d'onde si propagano dalla bassa atmosfera e molti collegamenti avvengono con l'ausilio della regione E, e quindi di un'area che potrebbe essere influenzata in modo importante dalla situazione meteo in basso, inoltre le regole dell'assorbimento sono governate dalla situazione molecolare dello strato D, (effetti delle onde gravitazionali sull'assorbimento delle onde radio) che e' lo strato più vicino alla troposfera e quindi più influenzato.

L'effetto quindi delle onde gravitazionali, e dei venti presenti nella stratosfera, hanno un qualche impatto sulla qualità della propagazione HF, si tenga presente che all'altezza delle regioni D ed E (Mesosfera) si ha la presenza di venti regolari e impetuosi anche di 300 Km/h, che potrebbero deteriorare l'uniformità degli strati.

Tendenzialmente, la propagazione sembra essere migliore in presenza di estese aree di alta pressione, anche perché la situazione complessiva degli assorbimenti dovrebbe essere migliore in presenza di vaste aree di bel tempo, risulta difficile tuttavia stabilire e capire che cosa avviene.

Il comportamento della ionosfera viene soprattutto influenzato dalla radiazione solare ultravioletta che è assorbita dalle varie specie chimiche presenti e conseguentemente dalla densità di elettroni liberi presenti nella Ionosfera (Figura 4), pertanto la situazione solare e geomagnetica rimane comunque l'azione determinante che governa la radio propagazione sulle frequenze HF.

C'è da dire inoltre, che la maggior parte dei collegamenti in onde corte avvengono su distanze grandissime, che coinvolgono stati e continenti, pertanto le condizioni meteorologiche possono essere le più varie possibili.

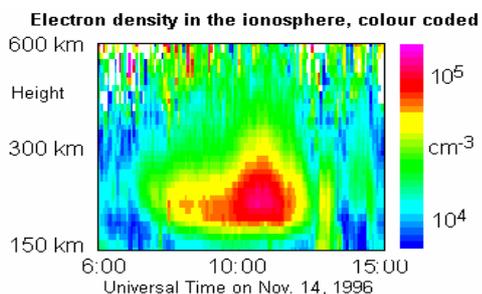


Fig.5 Esempio di densità elettronica nella Ionosfera, misurato con le Ionosonde del Max Planck Institute, appare evidente che la densità elettronica varia notevolmente con l'altezza e con l'ora locale, i diversi colori indicano il numero di elettroni liberi per centimetro cubo. (Immagine Max Planck Institute of Aeronomy).

Propagazione VHF

La situazione in questo caso si ribalta, i segnali VHF si propagano prevalentemente all'interno della Troposfera e quindi la situazione meteorologica diventa determinante e governa la propagazione delle frequenze VHF, dai 144 Mhz fino ai 430 Mhz.

Basta pensare che la rifrazione delle onde Vhf e' causata dal variare dell'indice di rifrazione dell'aria, causato dal variare delle caratteristiche del mezzo (umidità, densità dell'aria, pressione, temperatura) come raffigurato nella fig.6.

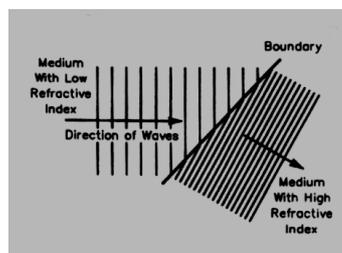
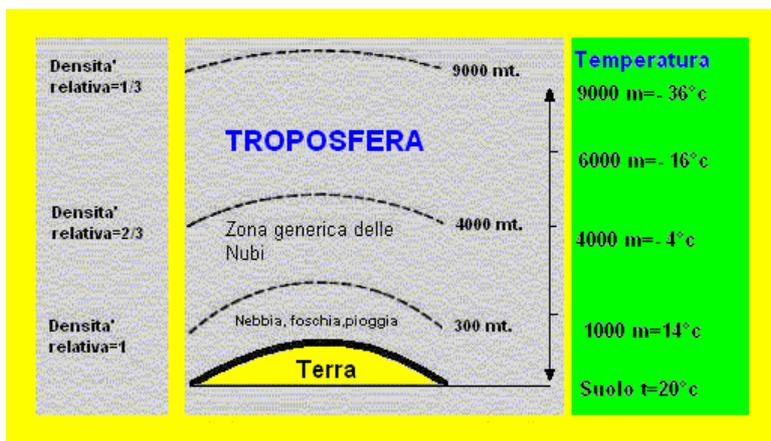


Fig.6

I segnali vhf che si propagano attraverso la troposfera subiscono una deviazione soprattutto negli strati compresi entro i primi chilometri di quota (3 -4 Km) poiché e' in quest'area che avvengono le maggiori variazioni, pertanto i vari fenomeni propagativi che coinvolgono la propagazione nelle Vhf, come:

- -Rifrazione e diffrazione troposferica
- -Tropo-scatter
- -Condotti troposferici

- -Inversione di temperatura
- -celle convettive

Sono una diretta conseguenza delle condizioni del tempo meteorologico.

E sporadico

La propagazione per Es ha molti punti di contatto con la situazione meteorologica.

L'azione combinata dei venti ionosferici e delle onde gravitazionali creano degli ammassamenti di ioni attorno ai 100 chilometri di quota causa appunto della propagazione Es (wind shear theory).

La condizione migliore sembra quella in cui un'area di bassa pressione viene a trovarsi tra due fronti freddi, poiché a queste condizioni meteorologiche dovrebbero essere associate forti venti e turbolenze all'altezza della regione E, si tratterebbe proprio di quei venti ionosferici che poi creano le condizioni per addensare gli ioni creando le cortine ad alta densità di elettroni liberi, causa appunto delle rifrazioni per E sporadico.

L'azione più o meno intensa delle onde gravitazionali, combinata alla presenza di altri catalizzatori esterni quali l'ablazione meteorica e la favorevole azione del campo geomagnetico determinerebbero poi l'intensità della ionizzazione e quindi la capacità di rimandare a terra onde a frequenza elevata, sappiamo che all'aumentare della frequenza utilizzata la capacità di rifrazione dell'Es diventa sempre più rara poiché diventa sempre più critico il livello di ionizzazione necessario, questo potrebbe essere dovuto alla difficoltà di avere contemporaneamente attivi tutti i fattori di cui abbiamo appena parlato.

Dovrebbe esserci inoltre una possibile correlazione tra i temporali e la formazione dello strato E sporadico.

Osservazioni pratiche sembrerebbero confermare questa teoria, poiché si è riscontrato frequentemente un significativo miglioramento delle condizioni di propagazione subito dopo un fenomeno temporalesco soprattutto sulle bande alte delle HF (21-24-28 Mhz).

Le correlazioni tra gli strati bassi e quelli più alti dell'atmosfera terrestre sembrerebbe supportare quest'ipotesi.

Le violente agitazioni presenti all'interno di un fronte temporalesco generano delle onde gravitazionali che si trasmettono fino alla ionosfera e questo potrebbe essere legato al miglioramento delle condizioni di propagazione innescate dal temporale nonché al possibile legame tra temporali ed E sporadico.

Questo legame anche se non ha ancora ottenuto un'omologazione scientifica, sembra essere sostenuto soprattutto dai radioamatori basandosi soprattutto su osservazioni pratiche e statistiche.

Tuttavia la scienza ufficiale tenderebbe ad escludere tale relazione sostenendo che le zone di transizione tra la troposfera e la ionosfera, denominate tropopausa e stratopausa proteggono per così dire gli strati riflettenti da influenze sulla composizione molecolare e di concentrazione elettronica da parte di fenomeni troposferici, oltre che non trovare una relazione statistica tra il verificarsi dell'Es e i temporali.

È altresì vero comunque che sulla terra si verificano statisticamente circa 100 scariche elettriche temporalesche ogni secondo, con una concentrazione soprattutto nella fascia dell'equatore e nell'emisfero estivo (l'incidenza dell'Es è maggiore nei mesi estivi e nella fascia tropicale), queste scariche elettriche sviluppano una quantità impressionante di energia, abbiamo quindi un livello enorme di energia potenziale che potrebbe agire come catalizzatore di Es, è sicuro che non tutte le celle temporalesche danno luogo alla formazione di Es ma potrebbe avvenire una combinazione di eventi dove appunto l'energia elettrica potrebbe avere la funzione di innesco.

Un ulteriore legame con le ipotesi appena discusse riguarda la scoperta fatta negli ultimi anni di un interessante fenomeno associato ai normali temporali, si tratta degli sprites rossi.

L'interrogativo è se e come, quest'enorme energia potenziale interagisce con la ionosfera e con i meccanismi di ionizzazione, influenzando la formazione dell'Es e la propagazione in generale.

Possibili effetti legati agli sprites

Si tratta di fenomeni simili ai fulmini che si sviluppano però nella stratosfera ad un'altezza compresa tra i 10 e i 100 chilometri, avvengono quindi delle scariche elettriche della durata di qualche decimo di secondo che si sviluppano a causa della differenza di potenziale tra le nubi e l'alta atmosfera.

Mentre in un primo momento si pensava che questi fenomeni fossero sempre associati a formazioni temporalesche, recenti ricerche scientifiche hanno dimostrato che gli sprites si possono verificare anche in assenza di temporali, questo se da una parte rende ancora più difficile l'interpretazione di questo misterioso fenomeno, dall'altra apre nuove prospettive sulle conseguenze che queste scariche elettriche possono avere sulla composizione chimica e sulla struttura della ionosfera terrestre e quindi anche sulla propagazione delle radio onde, siccome le scariche possono raggiungere l'altezza di 100 chilometri e gli eventi più estesi si possono propagare in un volume di 10000 chilometri cubi, coinvolgendo in pieno lo strato D ed E della Ionosfera.

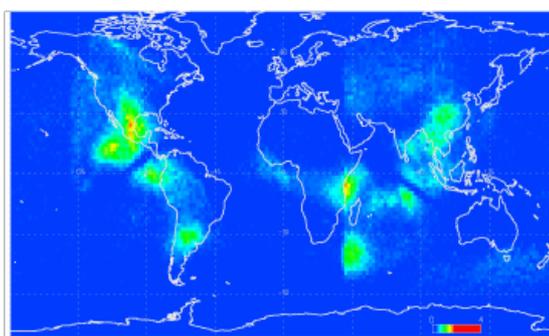


Fig.7 Sviluppo in verticale di uno sprite, la scarica si propaga dalla troposfera fino ad un'altezza di 100 chilometri, coinvolgendo direttamente la Ionosfera (regione D e regione E). La figura di destra mostra una media diurna dell'occorrenza degli sprite nella stagione estiva dell'emisfero nord. Si stima che l'occorrenza globale di sprite è di circa 720 eventi/giorno mediamente, si è trovato inoltre che le regioni più attive sono localizzate nel Nord e Sud America, Africa e Sud-est Asiatico.

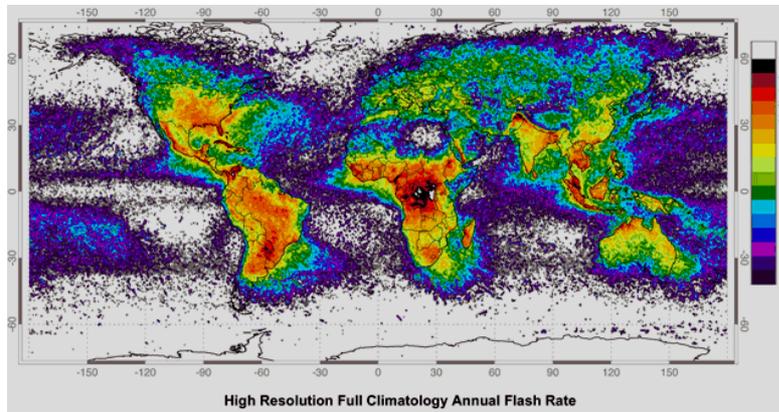


Fig.8: Distribuzione dei fulmini , da Aprile 1995 – Febbraio 2003 ottenuta dai satelliti della Nasa.
 I fulmini non sono distribuiti omogeneamente sul pianeta. La maggior parte di essi avviene sopra le terre emerse, come illustra la figura, si osservi anche la forte incidenza lungo la fascia tropicale soprattutto Africana.

Lightning scatter

Ark, PY2ZX, send me information on lightning scatter in VHF propagation. He has discussed this issue with many fellow hams in amateur radio and TV/FM dxing: Lightning scatter is observed between 100 and more than 500 MHz causing burstlike signal enhancements similar to meteor scatter. The scattering process is supported by columns of ionized air resulting from the lightning flashes. One of his colleagues suspects that horizontal cloud-to-cloud strokes can produce better signal reflections than cloud-to-ground strokes (in my view, it is the scatter geometry which is affected by the lightning's direction, i.e. backscatter with vertical strokes and forward scatter with horizontal lightnings). The dx distance appears limited to 600 kilometers maximum. Lightning scatter appears quite an interesting dx mode because meteorologists provide reliable forecasts allowing radio amateurs to conduct selective test runs.



Image: <http://www.atrims.umd.edu>

Assorbimento

Effetti meteorologici come onde gravitazionali, e riscaldamento stratosferico possono avere un impatto negativo sulle trasmissioni dei segnali radio specie per i segnali a frequenza più bassa (onde medie e bande basse dello spettro HF) poiché aumentano l'assorbimento della regione D.

L'assorbimento è causato dalle collisioni degli elettroni dell'onda elettromagnetica con gli atomi neutri presenti principalmente nella regione D, e per effetto di queste collisioni gli elettroni cedono energia.

Le onde gravitazionali atmosferiche tendono ad addensare gli ioni all'interno della regione D, innalzando quindi le probabilità di collisione aumentando di conseguenza l'assorbimento d'energia.

Osservazioni su larga scala mi hanno convinto sempre di più che gli assorbimenti giocano un ruolo determinante nella propagazione delle radio onde, per un'analisi delle condizioni di propagazione e per capire se un determinato collegamento è possibile, è necessario attribuire grande importanza al grado di assorbimento ionosferico, si tratta di un parametro determinante così come gli indici solari e geomagnetici.

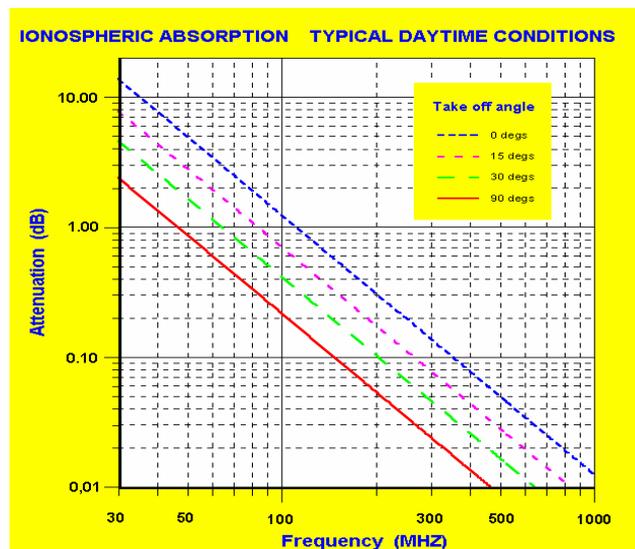


Fig.9: Assorbimento Ionosferico in base alla frequenza, condizioni diurne.

F.Egano - IK3XTV
flavio.egano@schneiderelectric.it
www.qsl.net/ik3xtv - Propagation Observatory

Hanno collaborato per alcune osservazioni e consulenze Tony de Longhi, iz3esv e prof. Volker Grassman, df5ai.

Bibliografia:

NOAA (National Atmospheric and Ocean Administration)
Articoli vari di Marino Miceli, I4SN
Mappe realizzate con il programma DX ATLAS
School of Physics, University of New South Wales, Sydney-Australia "The Lunar tide in Sporadic E"
UKSMG Six news Archives
Mid Latitude Sporadic E - Michael Hawk
Newton - Lo spettacolo della Scienza
Atlanti scientifici Giunti, Meteorologia
Dx Radius in Aurora and FAI radio propagation Volker Grassmann, DF5AI
Naval Research Laboratory Washington, DC
Earth's Ionosphere-Tor Hagfors, Kristian Schlegel - Max Planck Institute of Aeronomy, Katlenburg-Lindau, Germany
Atmospheric Gravity waves - Prof. Michael P. Hickey, Department of Physics and Astronomy- Clemson University, South Carolina
Department of Physics and Astronomy - University of Western Ontario - A Short Primer on Gravity waves
Geophysical Institute, University of Alaska
What are sprites? Jeremy Thomas
Matt Heavner, Red sprites and Blue jets
H.A.A.R.P. High Frequency Active Auroral Research Program, Alaska-USA
ARRL Handbook
Max Planck Institute of Aeronomy, Germany
Centro Studi Ionosferici
Darrel Emerson- Attenuation at VHF in Propagation through the Ionosphere
College of Engineering, The University of Iowa