L’isteresi degli strati ionosferici in 40 metri

Abstract

Questo studio analizza il fenomeno di isteresi ionosferica nella banda dei 40 metri, osservato tramite ricezione WSPR a bassa potenza (0,2 W) tra la stazione DL1FX (Germania) e Zanè (Italia). In condizioni di attività geomagnetica quieta e minimo solare, è stata misurata una netta asimmetria tra la persistenza serale della propagazione (1h06m dopo il tramonto) e il ritardo mattutino nella riattivazione (1h44m dopo l’alba). L’analisi evidenzia il ruolo differenziale degli strati D ed F: il primo scompare rapidamente al tramonto, riducendo l’assorbimento, mentre il secondo richiede tempi più lunghi per ristabilire una densità elettronica sufficiente alla riflessione. Viene inoltre considerato il contributo geometrico lungo il percorso ionosferico, con differenze di illuminazione tra i due estremi. Il confronto con misure radar incoerenti dell’osservatorio di Arecibo conferma che l’asimmetria alba-tramonto è legata a processi chimico-fisici non lineari, in particolare alla ricombinazione lenta e alla formazione differenziale delle specie ioniche. L’uso di segnali WSPR QRP si rivela efficace nel rilevare variazioni sottili della propagazione, offrendo una lente sensibile sulla dinamica ionosferica. Il lavoro propone una quantificazione precisa dell’isteresi e ne interpreta le cause fisiche, contribuendo alla comprensione dei ritardi inerziali nella risposta della ionosfera alle variazioni di radiazione solare.

Data: 2 ottobre 2025

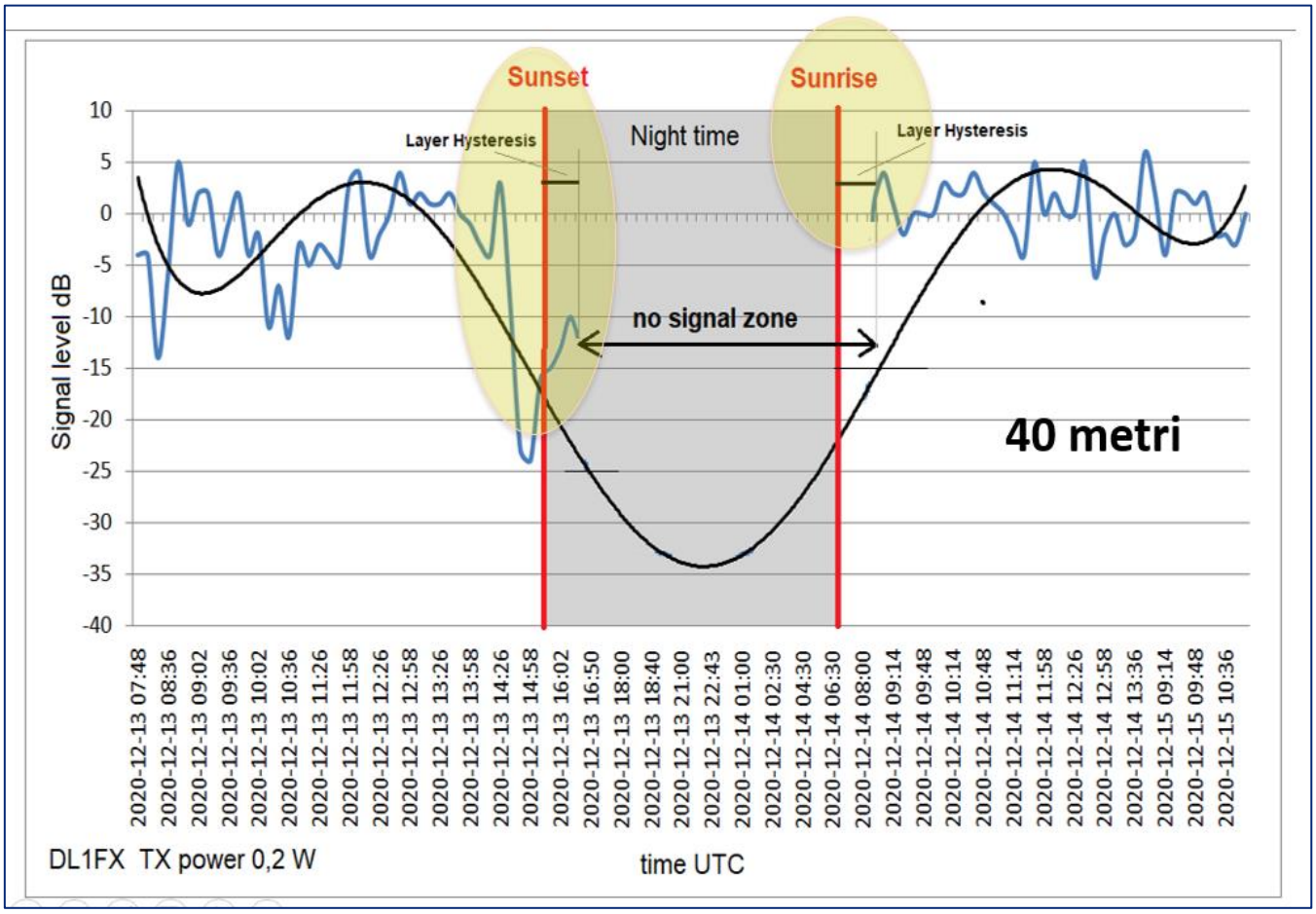
Amateur Radio Propagation Studies

www.qsl.net/ik3xtv

creative commons

L’isteresi degli strati ionosferici in 40 metri

Il grafico mostra la ricezione, nell’arco di due giorni, del segnale trasmesso dalla stazione tedesca DL1FX in WSPR sulla banda dei 40 metri. La potenza di trasmissione era di soli 0,2 W, mentre la ricezione è stata effettuata con la mia stazione e un’antenna Windom. La curva del segnale evidenzia chiaramente i fenomeni di isteresi ionosferica: la risposta della ionosfera non è immediata al variare della radiazione solare, ma segue con un certo ritardo, sia al tramonto sia all’alba.



Contesto Solare e Geomagnetico dell’Osservazione

L’analisi dell’isteresi degli strati ionosferici in 40 metri si è basata su dati raccolti in condizioni di attività spaziale molto calma, un fattore che consolida l’affidabilità dei ritardi inerziali (T_{in}) osservati nella risposta ionosferica. Nel periodo di osservazione, il 13–14 dicembre 2020, l’attività geomagnetica è stata classificata come *Quiet* (calma), con l’indice planetario Kp oscillante tra valori bassi (generalmente compresi tra 0 e 2). Questa assenza di perturbazioni, come le tempeste geomagnetiche, implica che la ionosfera abbia operato in uno stato di equilibrio quasi stazionario, reagendo unicamente alle variazioni della radiazione solare tra giorno e notte. Inoltre, il periodo corrispondeva a una fase prossima al minimo solare, con il Flusso Solare (F10.7) mantenuto su valori relativamente bassi (tipicamente 70–80 SFU). Tali condizioni di scarsa irradianza EUV comportano una densità elettronica ionosferica (Ne) ridotta rispetto ai periodi di massimo solare.
Questa bassa ionizzazione amplifica l’effetto dell’isteresi, specialmente nella banda dei 40 metri:

1. Assorbimento ridotto (Strato D): Il basso livello di flusso solare limita la ionizzazione dello strato D, riducendo l’assorbimento diurno e rendendo più evidente la fase di rilascio serale dovuta alla sua rapida scomparsa.

2. Soglia di riapertura critica (Strato F): La frequenza critica (foF2), particolarmente bassa in questo periodo, accentua il ritardo mattutino nella riattivazione della propagazione, ossia il tempo necessario affinché la MUF torni a superare i 7,04 MHz.

In sintesi, l’ambiente spaziale analizzato rappresenta un caso ideale per studiare la risposta inerziale della ionosfera in assenza di perturbazioni magnetiche esterne: una condizione che permette di isolare e quantificare in modo chiaro il comportamento di isteresi naturale tra ionizzazione e ricombinazione.

Isteresi Quantificata: L'Inerzia della Ionosfera

Il fenomeno dell'isteresi è stato quantificato con precisione confrontando gli orari effettivi di chiusura e riapertura del segnale WSPR a 7.0386 MHz con l'orario geometrico di alba e tramonto registrato a Zanè (ricevente) il 13-14 dicembre 2020 (Alba=06:46 UTC; Tramonto=15:34 UTC). I risultati hanno evidenziato una netta asimmetria tra i processi di decadimento e di rigenerazione ionosferica. L'Isteresi Serale è stata misurata in 1 ora e 6 minuti: il segnale si è prolungato fino alle 16:40 UTC, ben oltre il tramonto a terra. Questo ritardo è dovuto alla rapida dissoluzione dello Strato D (lo strato assorbente), che rimuove l'attenuazione e consente allo Strato F di riflettere il segnale. La No Signal Zone è durata 15 ore e 50 minuti (dalle 16:40 UTC alle 08:30 UTC), corrispondente al periodo in cui la densità elettronica dello Strato F è scesa sotto la soglia critica. Infine, l'Isteresi Mattutina è risultata significativamente più lunga, pari a 1 ora e 44 minuti, con la riapertura della banda avvenuta solo alle 08:30 UTC. Questo maggiore ritardo riflette l'inerzia dello Strato F: è il tempo necessario affinché il flusso solare ripristini una densità elettronica tale da portare la frequenza critica (foF2) sopra la frequenza di lavoro, condizione essenziale per la riflessione.

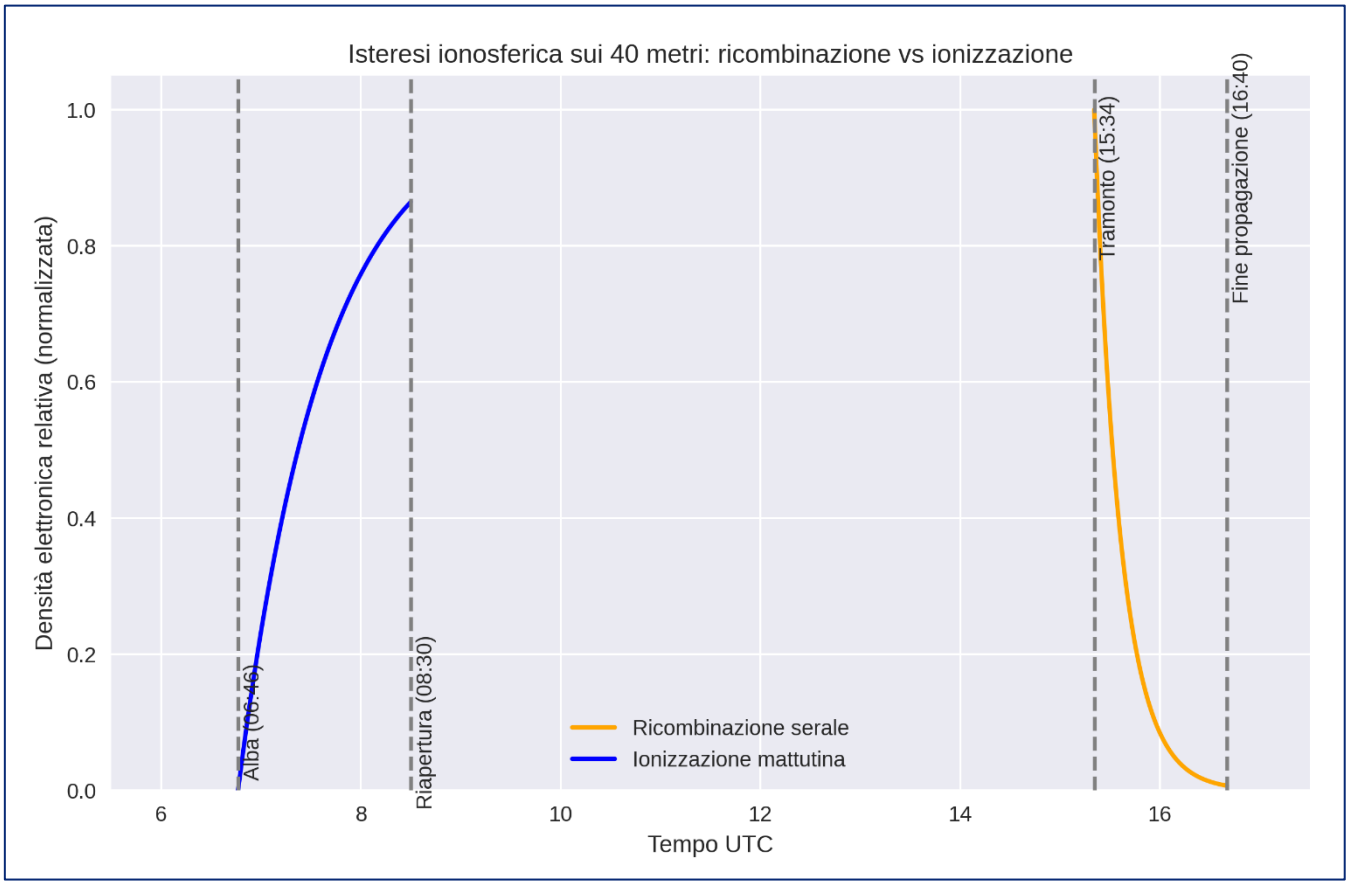


Fig. Diagramma dell’isteresi ionosferica sui 40 metri: la curva arancione rappresenta la ricombinazione serale, con cessazione della propagazione 1h06m dopo il tramonto geometrico (15:34 UTC); la curva blu mostra la lenta rigenerazione mattutina, con riattivazione del segnale 1h44m dopo l’alba geometrica (06:46 UTC). L’asimmetria evidenzia l’inerzia fisica degli strati ionosferici, in particolare del

F, nella risposta alla variazione di radiazione solare. Come mostrato nel diagramma, la curva serale risulta più ripida rispetto a quella mattutina, evidenziando la diversa velocità dei processi di ricombinazione e ionizzazione.

Riepilogo Quantitativo dell'Isteresi (40 Metri)

Evento	Orario di Riferimento	Orario Effettivo	Durata	Meccanismo Dominante
Isteresi Serale	Tramonto 15 : 34 UTC	Chiusura 16 : 40 UTC	**1 ora e 6 minuti**	**Rapida Dissoluzione Strato D** (Fine Assorbimento)
No Signal Zone	Fine Propagazione 16 : 40 UTC	Inizio Propagazione 08 : 30 UTC	**15 ore e 50 minuti**	f_oF2 sotto 7.0386 MHz
Isteresi Mattutina	Alba 06 : 46 UTC	Riapertura 08 : 30 UTC	**1 ora e 44 minuti**	**Lenta Rigenerazione Strato F** (f_oF2 torna sopra 7.0386 MHz)

Asimmetria Geometrica e Contributo alla Transizione

La quantificazione dell'isteresi deve tenere conto che il percorso Zanè-Alsbach-Haehnlein (≈550 km) non subisce l'alba e il tramonto simultaneamente. Esiste una significativa asimmetria geometrica dovuta alla differenza di longitudine (Alsbach è più a Ovest di Zanè). Questa differenza crea un "fronte d'ombra" o un "fronte di luce" che si muove lungo la traiettoria di riflessione ionosferica, influenzando la gradualità delle transizioni.
Abbiamo calcolato le differenze di orario geometrico tra i due estremi del percorso il 13 dicembre 2020:

Evento Geometrico	Zanè (Estremo Est)	Alsbach (Estremo Ovest)	Differenza Longitudinale
Alba	06 : 46 UTC	07 : 33 UTC	**47 minuti**
Tramonto	15 : 34 UTC	15 : 58 UTC	**24 minuti**

Queste asimmetrie contribuiscono al tempo totale dell'isteresi, in quanto l'interruttore ionosferico non si spegne o accende in modo istantaneo lungo l'intero percorso:

- Contributo Serale: I 24 minuti di differenza al tramonto indicano che il segmento più a Ovest della rotta rimane illuminato più a lungo. Questa asimmetria geometrica somma il suo effetto all'inerzia fisica dello Strato D, contribuendo a mantenere la propagazione attiva oltre l'orario del tramonto di Zanè.
- Contributo Mattutino: I 47 minuti di differenza all'alba indicano che la ionizzazione inizia quasi un'ora prima a Est che a Ovest. Nonostante questo vantaggio geometrico, la lenta rigenerazione fisica dello Strato F domina il fenomeno. La banda si riapre solo alle 08:30 UTC, ben dopo che l'illuminazione ha raggiunto l'intero percorso, a conferma che l'isteresi mattutina è prevalentemente un ritardo cinetico (tempo di accumulo elettronico) e non un semplice ritardo geometrico.

In conclusione, l'isteresi misurata rappresenta il risultato combinato dell'asimmetria geometrica del percorso e dell'inerzia fisica degli strati ionosferici D e F.

Alba/Tramonto Geometrico al Suolo (Riferimento per il Calcolo)
Gli orari 06:46 UTC e 15:34 UTC (a Zanè) si riferiscono all'Alba/Tramonto Geometrico al Suolo. Questo dato serve come riferimento temporale stabile e oggettivo per calcolare il ritardo totale dell'isteresi.

Alba/Tramonto Geometrico Ionosferico (Il Vero Inizio della Causa)
Gli orari effettivi in cui la ionizzazione/ricombinazione inizia nello spazio sono in realtà anticipati (all'alba) o ritardati (al tramonto) rispetto al suolo, a causa dell'altezza degli strati.

- Strato D (≈80 km): La scomparsa del D che provoca l'Isteresi Serale inizia pochi minuti dopo il tramonto geometrico al suolo, ma è comunque un effetto che si verifica *prima* del tramonto a terra. Il tuo ritardo di 1 ora e 6 minuti (Isteresi Serale) è il tempo che intercorre tra il tramonto a Zanè e la totale cessazione dell'assorbimento su tutto il percorso.
- Strato F (≈300 km): L'illuminazione dello Strato F che ricrea la ionizzazione avviene molto prima dell'alba geometrica al suolo. Il tuo ritardo di 1 ora e 44 minuti (Isteresi Mattutina) dimostra che la lenta inerzia fisica dello Strato F nel raggiungere la soglia di 7.0386 MHz è molto più influente dell'anticipo geometrico stesso.

Nota: L'isteresi è misurata come il ritardo tra l'alba/tramonto geometrico al suolo (punto di riferimento 06:46 UTC e 15:34 UTC a Zanè) e l'effettiva chiusura o riapertura del segnale. Le differenze riscontrate sono il risultato combinato dell'anticipo geometrico ionosferico e dell'inerzia fisica degli strati D e F.

La struttura della ionosfera
Per comprendere questo comportamento, occorre ricordare che la ionosfera è composta da diversi strati, ciascuno con caratteristiche e dinamiche proprie:

- Strato D: presente solo di giorno, tra 50 e 90 km di quota. È responsabile dell’assorbimento delle frequenze medio-basse (come i 40 metri) durante le ore diurne. Al tramonto scompare rapidamente, ma non istantaneamente.
- Strato E: situato tra 90 e 130 km. Di giorno contribuisce alla riflessione delle frequenze basse, mentre di notte si indebolisce molto.
- Strato F1 e F2: al di sopra dei 150 km. Di giorno si distinguono due sottostrati, che si fondono in un unico strato F durante la notte. È questo strato che garantisce le riflessioni sulle bande basse e medie.

Ogni strato è governato dall’equilibrio fra ionizzazione (creata dai raggi ultravioletti e dai raggi X solari) e ricombinazione (quando elettroni e ioni tornano a neutralizzarsi).
Tramonto: la lenta ricombinazione
Nel grafico, al tramonto, il segnale non si interrompe subito. Lo strato D, che assorbiva parte del segnale durante il giorno, si dissolve gradualmente. Questo paradossalmente può migliorare le condizioni iniziali della propagazione, perché viene meno l’assorbimento, mentre lo strato F conserva ancora una buona ionizzazione residua. Si crea così una finestra in cui la ricezione resta possibile anche dopo il calare del sole: è l’isteresi al tramonto.
Notte: l’assenza di propagazione
Nelle ore centrali della notte, la situazione cambia drasticamente. L’energia solare non alimenta più gli strati ionosferici, e la densità elettronica dello strato F scende al punto che la sua frequenza critica si porta al di sotto dei 7 MHz. In queste condizioni, la banda dei 40 metri non può più essere riflessa verso terra. È la cosiddetta zona di assenza di segnale, ben evidente nel grafico come un lungo intervallo privo di ricezioni.
Alba: la lenta ricostruzione
Con la prima luce, lo strato F non torna subito operativo. Servono minuti, talvolta ore, perché la radiazione solare ristabilisca un’adeguata ionizzazione. Anche lo strato D torna ad attivarsi, introducendo di nuovo attenuazione. Il

risultato è una isteresi all’alba: il segnale riappare solo dopo un ritardo, con livelli che crescono progressivamente fino a stabilizzarsi nel corso della giornata.

Ruolo dello Strato E nella propagazione in 40 metri

Sebbene lo strato E non sia il principale riflettore per i 7 MHz, esso interviene nei periodi di transizione tra giorno e notte e, in alcune condizioni, anche nelle ore centrali della giornata. Durante il giorno può riflettere i segnali a distanza medio-corta (100–1500 km), in particolare quando la sua ionizzazione è elevata. In questi casi si osservano anche fenomeni di riflessione quasi verticale (NVIS), in cui il segnale viene irradiato con un angolo molto alto, riflesso quasi perpendicolarmente dallo strato E (o F inferiore) e ricevuto entro un raggio di poche centinaia di chilometri. Questo tipo di propagazione spiega la ricezione di stazioni molto vicine (100–300 km) anche in pieno giorno, quando normalmente la riflessione obliqua a lunga distanza non sarebbe possibile.
Al tramonto, quando lo strato D si dissolve ma lo strato F conserva ancora una buona ionizzazione, lo strato E può prolungare la propagazione grazie alla sua ricombinazione più lenta. Nelle prime ore del mattino, la sua riattivazione anticipa quella dello strato F, offrendo una breve finestra di riflessione anche prima che la MUF torni sopra i 7 MHz. Il suo contributo, pur secondario rispetto allo strato F, è dunque parte integrante dell’isteresi ionosferica osservata sui 40 metri, e gioca un ruolo essenziale nella propagazione NVIS e nei fenomeni di skip corto.

Il significato dell’isteresi

Il comportamento della ionosfera può essere immaginato come quello di un materiale che non reagisce istantaneamente a uno stimolo, ma conserva una sorta di memoria del suo stato precedente.
In radio, questa memoria si traduce in:

- propagazione che si prolunga oltre il tramonto, anche senza radiazione solare;
- ritardo nel ritorno della propagazione al mattino, nonostante il sole sia già sorto.

Per gli operatori sulle bande basse, come i 40 metri, conoscere e interpretare questi fenomeni è essenziale. Non basta guardare l’orologio o la posizione del Sole: bisogna considerare che la ionosfera segue i propri ritmi, dettati da processi fisici che hanno inerzia e tempi propri.

Fenomeni di fading

Durante le osservazioni emerge con chiarezza la presenza di forti variazioni giornaliere nell’intensità del segnale, riconducibili a fenomeni di fading. Le cause principali sono da attribuire all’interferenza multi percorso, in cui segnali giunti da traiettorie diverse si sommano in fase o in opposizione producendo variazioni anche repentine di ampiezza, e alla naturale variabilità della densità elettronica degli strati ionosferici, soggetti a continui mutamenti legati sia all’illuminazione solare sia a processi dinamici interni (onde atmosferiche, attività geomagnetica). Un ulteriore contributo proviene dall’assorbimento nello strato D, che durante le ore diurne riduce significativamente la trasparenza della banda dei 7 MHz, mentre al tramonto la sua rapida scomparsa determina un innalzamento dell’intensità ricevuta. L’insieme di questi processi rende la propagazione a bassa potenza particolarmente sensibile, mettendo in risalto fluttuazioni che altrimenti resterebbero parzialmente mascherate.

I Tempi di Ricombinazione: La Chiave dell'Isteresi

Strato	Altitudine	Velocità di Ricombinazione	Tempo Caratteristico	Conseguenza sull'isteresi (40 m)
D	Bassa (≈ 50 – 90 km)	Molto veloce	10 secondi – 1 minuto	Si dissolve rapidamente al tramonto, **eliminando l'assorbimento** e prolungando la ricezione serale.
E	Media (≈ 90 – 150 km)	Moderata	Minuti – decine di minuti	Può riflettere segnali a skip corto e NVIS. La sua **ricombinazione più lenta** rispetto al D contribuisce all'**isteresi serale** e ritarda la propagazione mattutina.
F	Alta (≈ 200 – 400 km)	Lenta	1 – 3 ore	Il plasma ionizzato **persiste di notte** (isteresi serale) e richiede molto tempo per rigenerarsi all'alba (isteresi mattutina).

La marcata asimmetria tra tramonto e alba è una diretta conseguenza dei diversi tempi di ricombinazione (cioè, il tempo necessario agli elettroni per ricongiungersi agli ioni e neutralizzarsi) tra gli strati D e F.

Considerazioni finali

L'analisi del grafico mette in evidenza che l'andamento della propagazione non è determinato unicamente dalla geometria del Sole rispetto alla Terra, ma anche dalla dinamica interna degli strati ionosferici. In termini geometrici, uno strato a quota h continua a ricevere radiazione solare anche dopo il tramonto locale osservato al suolo, e viceversa viene illuminato prima dell'alba: l'angolo di differenza è $\Delta\theta \approx \sqrt{(2h/R)}$, dove R è il raggio terrestre. Per lo strato E ($h \approx 100$ km) questo valore è di circa 10°, mentre per lo strato F2 ($h \approx 300$ km) raggiunge i 17°. Ciò implica che la ionosfera "vede" il Sole fino a quando a terra esso è già 10–17° sotto l'orizzonte, e lo intercetta altrettanto in anticipo al mattino. Tuttavia, il comportamento reale mostra una forte asimmetria: al tramonto la propagazione persiste oltre il limite geometrico, grazie alla ricombinazione lenta che conserva per un certo tempo una sufficiente densità elettronica; all'alba, invece, nonostante gli strati superiori siano già illuminati, la propagazione riappare solo in ritardo, perché durante la notte la densità elettronica è scesa a valori molto bassi e occorre tempo perché il flusso solare ristabilisca una frequenza critica (foF2) superiore ai 7 MHz. In sintesi, l'isteresi osservata nasce dalla combinazione tra la geometria della radiazione solare sugli strati ad alta quota e i tempi caratteristici dei processi di ionizzazione e ricombinazione, che introducono un surplus serale e un deficit mattutino, rendendo il ciclo di tramonto e alba intrinsecamente asimmetrico. L'utilizzo di potenze molto basse, come nel caso dei 200 mW di DL1FX in WSPR, consente di osservare la propagazione ionosferica in modo particolarmente sensibile. In tali condizioni il segnale dipende quasi esclusivamente dall'efficienza del mezzo: anche una minima riduzione della densità elettronica o un incremento dell'assorbimento si traducono immediatamente nella scomparsa della ricezione. Al contrario, con potenze elevate tipiche del broadcasting (decine o centinaia di kilowatt), gli stessi fenomeni risultano in gran parte mascherati, poiché l'elevata intensità del segnale è in grado di superare attenuazioni significative e mantenere un rapporto segnale/rumore ancora favorevole. In questo senso, i sistemi QRP e i beacon a bassa potenza operano come una sorta di "lente di ingrandimento" sulla ionosfera, mettendone in evidenza i dettagli e le variazioni sottili che le alte potenze tendono a occultare.

Evidenze sperimentali sulla asimmetria alba-tramonto
Uno studio complementare condotto presso l'osservatorio di Arecibo (Portorico), pubblicato nel 2022, ha analizzato la densità elettronica dello strato D durante le transizioni di alba e tramonto mediante misure radar incoerenti. I risultati hanno evidenziato una netta asimmetria tra i due momenti: al tramonto, la densità elettronica residua si mantiene più elevata rispetto all'alba, dove la ricostruzione ionica avviene più lentamente. Questo comportamento è attribuito ai diversi meccanismi chimico-fisici di ricombinazione e ionizzazione, con tempi di risposta non simmetrici. Lo studio ha inoltre confrontato i dati osservativi con modelli atmosferici (SIC e WACCM-D), mostrando che le simulazioni tendono a sottostimare il ritardo mattutino, confermando l'importanza di misure dirette per comprendere la dinamica reale della ionosfera. Tali risultati sono pienamente coerenti con le osservazioni WSPR presentate in questo articolo, dove l'isteresi mattutina risulta significativamente più lunga di quella serale, a conferma dell'inerzia fisica dominante nella fase di riattivazione.
Mathews T., Friedrich M., Baumgarten G., "Arecibo measurements of D-region electron densities during sunset and sunrise: implications for atmospheric composition", Annales Geophysicae, vol. 40, pp. 519–534, 2022. DOI: 10.5194/angeo-40-519-2022. Licenza: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Approfondimento: la spiegazione fisica dell'asimmetria secondo Arecibo
Le misure radar incoerenti effettuate presso l'osservatorio di Arecibo hanno evidenziato che la densità elettronica nello strato D (60–100 km) non segue simmetricamente il ciclo solare. Al tramonto, la ricombinazione degli elettroni è rallentata dalla presenza di specie neutre come NO e O_3, che favoriscono il mantenimento della ionizzazione residua attraverso processi di attaccamento lento. All'alba, invece, la ionizzazione richiede la ricostruzione completa delle specie ioniche, in particolare NO^+ e O_2^+, che dipendono dalla radiazione solare UV e X. Questo comporta un ritardo più marcato nella formazione della densità elettronica sufficiente per la riflessione radio. Lo studio ha mostrato che i modelli atmosferici sottostimano sistematicamente il ritardo mattutino, confermando che la risposta chimico-fisica della ionosfera è dominata da processi non lineari e da tempi di reazione differenti tra sera e mattina. Questi risultati rafforzano l'interpretazione dell'isteresi ionosferica come fenomeno fisico reale, osservabile anche con segnali WSPR a bassa potenza.

Confronto: 40 metri vs 20 metri
Il confronto tra la banda dei 40 metri (7 MHz) e quella dei 20 metri (14 MHz) evidenzia differenze significative nella propagazione e nel comportamento ionosferico. La banda dei 40 metri è influenzata principalmente dagli strati D, E e F. Durante il giorno, lo strato D causa un assorbimento che riduce la trasparenza della banda, mentre lo strato E può riflettere segnali a skip corto (tra 100 e 1500 km) e consentire riflessioni quasi verticali (NVIS), rendendo udibili stazioni molto vicine (entro 300 km). Al tramonto, la rapida scomparsa dello strato D e la lenta ricombinazione degli strati E e F favoriscono la persistenza del segnale, generando la tipica isteresi serale. Di notte, gli strati D ed E si indeboliscono fortemente e la riflessione avviene quasi esclusivamente dallo strato F, che consente collegamenti a lungo raggio finché la sua frequenza critica resta superiore a 7 MHz. Quando questa scende al di sotto, la banda si chiude. Il motore dell'isteresi è legato all'asimmetria tra la rapida cessazione dell'assorbimento nello strato D e la più lenta ricombinazione degli strati superiori, oltre alla diversa risposta ionica tra alba e tramonto, che prolunga la propagazione serale e ritarda quella mattutina.

La banda dei 20 metri (14 MHz), invece, è dominata dallo strato F2, con un contributo marginale dello strato E. Durante il giorno, la propagazione è generalmente ottima: l'assorbimento nello strato D è minimo e lo strato E ha un effetto trascurabile a queste frequenze. Il segnale viene riflesso principalmente dallo strato F2, che presenta una MUF elevata. Di notte, lo strato F2 rimane l'unico riflettore. Tuttavia, quando la MUF scende sotto i 14 MHz, la banda si chiude e la propagazione termina. In questo caso, non si osserva un vero e proprio fenomeno di isteresi.

Perché la propagazione migliora al tramonto nonostante lo strato D?

- Lo strato D della ionosfera è noto per il suo effetto di assorbimento sulle onde radio a bassa frequenza, come quelle dei 40 metri. Più è ionizzato, più attenua il segnale. Tuttavia, le osservazioni WSPR e lo studio Arecibo mostrano che al tramonto, anche se la densità elettronica del D non crolla istantaneamente, l'assorbimento cala abbastanza da permettere il passaggio del segnale. Questo accade perché:
- Anche una piccola riduzione della densità elettronica nel D comporta una grande diminuzione dell'assorbimento.
- Lo strato F, ancora ben ionizzato, riflette efficacemente il segnale.
- Il risultato è una persistenza della propagazione oltre il tramonto geometrico: è l'isteresi serale.
- All'alba, invece, lo strato D si riattiva rapidamente, tornando ad assorbire. Ma lo strato F è ancora troppo debole per riflettere. Quindi:
- Il segnale viene assorbito dal D.
- Non viene riflesso dal F.
- Il risultato è un ritardo nella riattivazione della propagazione: è l'isteresi mattutina.
- In sintesi, al tramonto il D si dissolve abbastanza da "lasciar passare" il segnale, mentre all'alba torna ad assorbire prima che il F sia pronto a riflettere. È questa dissociazione temporale tra assorbimento e riflessione a generare l'asimmetria osservata.

Conclusione

L'effetto di isteresi è un fenomeno osservabile su tutte le bande HF, ma il meccanismo dominante varia con la frequenza. Sui 40 metri, la dinamica è influenzata dall'interazione tra gli strati D, E e F, con un rilascio serale marcato — dovuto alla rapida dissoluzione dello strato D — e una riattivazione mattutina più lenta, legata alla rigenerazione dello strato F. Sui 20 metri, invece, domina lo strato F2, e la variazione della MUF diventa il parametro critico per la riapertura della propagazione. L'esperimento di ricezione tra DL1FX e Zanè, condotto con segnali WSPR a bassa potenza, è stato progettato appositamente per studiare l'isteresi ionosferica in condizioni favorevoli all'analisi dei ritardi tra alba e tramonto. Questo percorso non rappresenta il comportamento generale della banda dei 40 metri, che non è esclusivamente notturna: essa può presentare aperture regolari anche durante il giorno, in funzione della distanza tra le stazioni, della geometria del percorso e delle condizioni ionosferiche. L'uso di segnali QRP si è rivelato particolarmente efficace per mettere in evidenza queste transizioni: la sensibilità del sistema consente di rilevare anche minime variazioni nella densità elettronica e nell'assorbimento, che sarebbero altrimenti mascherate da potenze elevate. Va inoltre considerato che i tempi di alba e tramonto non coincidono perfettamente tra le stazioni coinvolte, a causa della diversa longitudine. Questo introduce uno scarto geometrico nell'illuminazione solare lungo la tratta, che contribuisce a modulare la durata apparente della propagazione. Tuttavia, l'ampiezza temporale osservata — soprattutto nella fase mattutina — non può essere attribuita esclusivamente alla geometria solare. È l'effetto combinato tra l'esposizione differenziale alla radiazione e la risposta inerziale della ionosfera, governata dai tempi di ricombinazione e rigenerazione degli strati E e F, a definire il comportamento complessivo osservato sui 40 metri. In questo senso, l'isteresi ionosferica non è solo un fenomeno geometrico, ma una manifestazione concreta della fisica atmosferica, che riflette la memoria e la lentezza dei processi ionici nel rispondere alle variazioni del Sole.

Nota sul contesto sperimentale e sulla natura dei grafici

Il grafico principale presentato in questo studio è stato realizzato tracciando le ricezioni WSPR della trasmissione a bassa potenza (200 mW) della stazione DL1FX sulla banda dei 40 metri. Questo percorso è stato scelto appositamente per evidenziare il fenomeno di isteresi ionosferica, in condizioni di propagazione favorevoli all'analisi dei ritardi tra alba e tramonto. Va tuttavia precisato che tale configurazione non rappresenta in modo esaustivo il comportamento generale della banda dei 40 metri, che non è esclusivamente notturna: essa può presentare aperture regolari anche durante il giorno, a seconda della distanza tra le stazioni, della geometria del

percorso e delle condizioni ionosferiche. Il secondo grafico, riportato a parte, mostra invece una giornata indicativa di ricezioni WSPR effettuate dalla stazione I0.. in Italia centrale, e offre una panoramica utile per comprendere le variazioni di propagazione nel corso delle 24 ore.

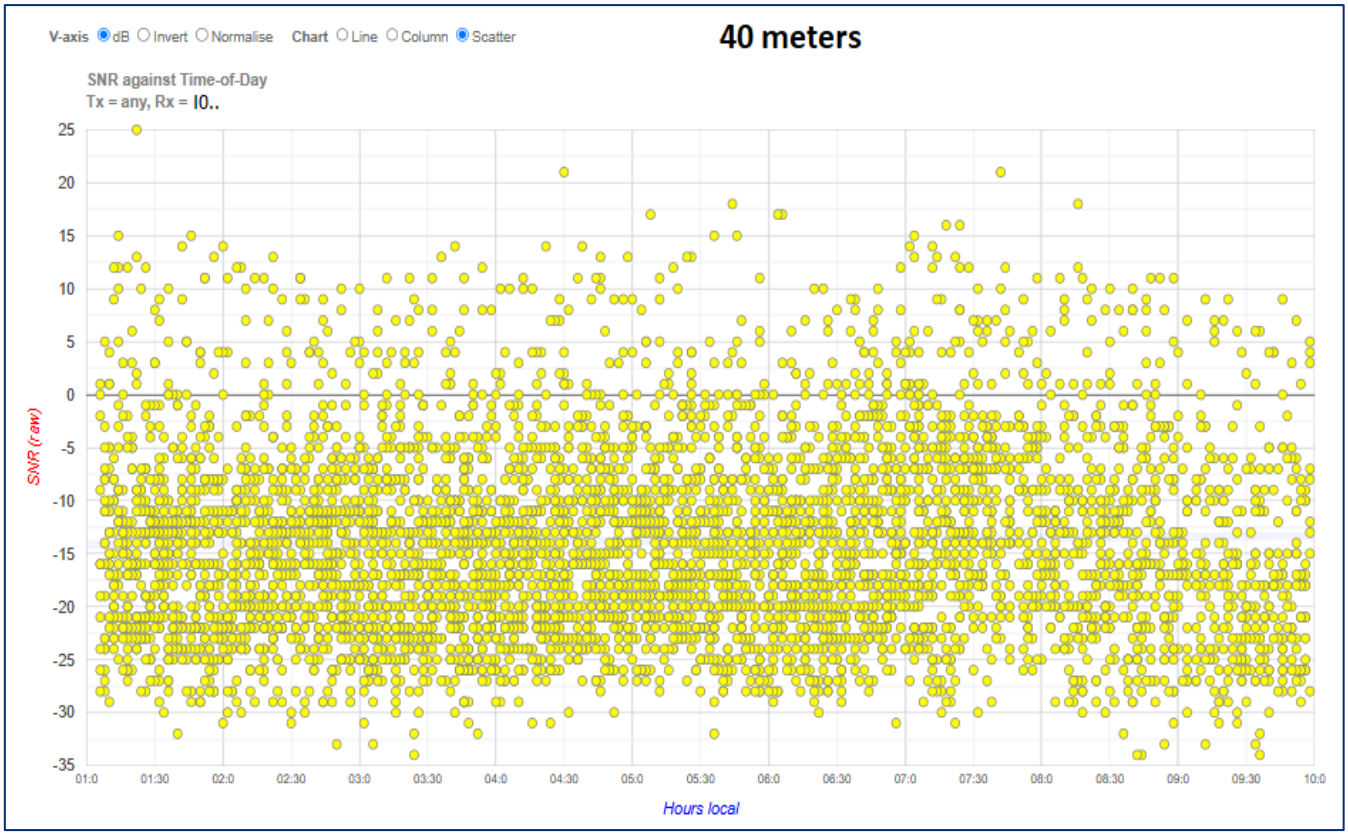


Fig. Questa panoramica mostra le ricezioni WSPR (Weak Signal Propagation Reporter) sulla banda dei 40 metri (7 MHz) nell'arco di una giornata, con l'asse orizzontale che rappresenta le ore locali e l'asse verticale che indica il rapporto segnale/rumore (SNR) in dB. A differenza del grafico specifico sull'isteresi (DL1FX - Zanè) che mostra una chiusura notturna prolungata, questo diagramma evidenzia che la propagazione in 40 metri non è esclusivamente notturna[2]. La distribuzione dei punti gialli dimostra una presenza di segnali lungo tutte le 24 ore, con una generale fluttuazione di intensità tipica dei fenomeni di fading. La dinamica generale della banda è influenzata principalmente da: Giorno: Presenza di segnali, spesso legati a propagazione a skip corto (NVIS) riflessa dagli strati E o F inferiori, con un'attenuazione dovuta all'assorbimento dello Strato D. Transizione/Notte: La dissoluzione dello Strato D al tramonto riduce l'assorbimento, favorendo le aperture a lungo raggio dallo Strato F, fino a quando la frequenza critica foF2 scende al di sotto dei 7 MHz. Il grafico funge da contesto generale, mostrando l'andamento della propagazione come una distribuzione continua, ma non isola il fenomeno di isteresi come fa l'analisi dedicata al percorso DL1FX-Zanè. I dati di ricezione WSPR utilizzati in questa analisi provengono da WSPR.Rocks - https://wspr.rocks/ (gestito da Phil – VK7JJ) e sono utilizzati con autorizzazione del gestore del sito.

Nota metodologica

I tempi di alba e tramonto utilizzati come riferimento per il calcolo dell'isteresi ionosferica si riferiscono al QTH ricevente di Zanè (IK3XTV). Il punto di riflessione ionosferico medio, situato approssimativamente a metà percorso fra Zanè e la stazione DL1FX, risulta geograficamente più a ovest di circa 1,4 gradi di longitudine. Tale differenza comporta un ritardo di circa 5–6 minuti sia per l'alba che per il tramonto rispetto ai corrispondenti tempi locali di Zanè. Una correzione basata su questo punto mediano ridurrebbe pertanto i valori misurati di isteresi (serale e mattutina) di un intervallo analogo, senza tuttavia modificare in modo significativo l'ordine di grandezza né le conclusioni dello studio. In altre parole, l'effetto di inerzia ionosferica resta evidente e sostanzialmente invariato anche considerando la geometria reale del percorso di propagazione.

Questo articolo è distribuito con licenza Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). Può essere condiviso e adattato per scopi non commerciali, a condizione che venga attribuito all'autore originale.