

INTRODUZIONE AL METEOR SCATTER

di Massimo Devetti, IV3NDC

Il fenomeno propagativo noto come Meteor Scatter (MS) è alla base di una delle tecniche più affascinanti nell'attività DX sulla bande VHF. Al tempo stesso, come vedremo, costituisce una delle modalità più accessibili e pratiche per coprire grandi distanze sulle VHF (oltre che per racimolare nuove entità DXCC e Square...), con fruibilità in qualche modo continua nell'arco dell'anno.

Una buona conoscenza della fisica del MS e delle relative tecniche operative, da usarsi nell'effettuazione dei QSO, permette anche a stazioni non particolarmente attrezzate di ottenere ottimi risultati. Contrariamente a quanto qualcuno crede infatti, il DX via MS è, entro certi limiti, alla portata anche di stazioni medio-piccole!

Il Meteor Scatter si basa su fenomeni di Diffusione (Scattering) e/o Riflessione sulle scie ionizzate prodotte da Meteoroidi entrati nell'atmosfera terrestre. Le note "Stelle Cadenti", per capirsi. Ciò permette, in determinate condizioni, contatti a lunga distanza sulle bande VHF (e non solo) in ogni periodo dell'anno.

Il MS è utilizzato fin dagli anni '50 per comunicazione dati a basso *throughput*, in link radio professionali e militari; cionondimeno è diventato ben presto di interesse della comunità radioamatoriale, per collegamenti a lunga distanza nelle bande comprese tra 28 e 432 MHz. Vengono di seguito riportati alcuni cenni introduttivi sulla fisica del MS e sulle relative modalità di utilizzo in campo radioamatoriale.

Cos'è una Meteora?

Lo spazio attorno al nostro pianeta non è completamente vuoto, ma sempre attraversato da polveri e detriti; le dimensioni di questi sono variabili, si va dalle particelle microscopiche fino a veri e propri sassi. Queste particelle sono in generale chiamate **Meteoroidi**.

Alcuni di questi meteoroidi sono in grado di entrare nell'atmosfera terrestre grazie ad effetti gravitazionali, una volta che la loro orbita interseca (o si avvicina a) quella della Terra.

Quando un meteoroido attraversa (ad alta velocità) strati dell'atmosfera sufficientemente densi, esso dissipa l'energia (in particolare cinetica) ed il materiale di cui è costituito, in una breve "vampata", a causa dell'attrito con le molecole di gas dell'atmosfera e dalla violenta compressione subita dai gas nella sezione frontale di impatto del meteoroido.

La trasformazione dell'energia in calore ed in radiazione dà luogo, nello spettro del visibile, alla cosiddetta "Stella Cadente" (o Meteora), un evento spettacolare che tutti abbiamo avuto modo più volte di osservare ammirando il cielo nelle notti serene.

Meteoroidi particolarmente brillanti vengono chiamate *Fireballs*, mentre se l'oggetto appare esplodere nell'avvicinamento al suolo, si parla di *Bolide*. In casi molto rari, un frammento di un meteoroido di grandi dimensioni è in grado di sopravvivere all'impatto con l'atmosfera, raggiungendo così il suolo sotto forma di *Meteorite*.

Questo è tuttavia un evento rarissimo; la maggior parte dei meteoroidi è costituito da particelle piccolissime: minori sono le dimensioni, maggiore è la loro numero nello spazio interplanetario.

I meteoroidi più piccoli sono detti *Micrometeoriti*. Essi possono essere così piccoli che, nell'entrata in atmosfera non perdono quasi massa e non raggiungono il punto di incandescenza; per questo motivo questi meteoroidi non possono essere rilevati né con tecniche ottiche né radio.

Le particelle di dimensioni maggiori possono invece essere osservate visivamente (oppure con tecniche telescopiche, video o fotografiche) o rilevate con sistemi radio.

Si stima che nell'intera atmosfera terrestre "brucino", giornalmente, dai 100 ai 200 milioni di meteoroidi visibili; sono centinaia le tonnellate di polveri cosmiche che raggiungono la superficie terrestre ogni giorno.

Micrometeoroidi	Massa < 10^{-7} g
Meteoroidi	10^{-7} g < Massa < 10^3 g
Meteoriti	Massa > 10^3 g

Talvolta la Terra attraversa, nel suo moto orbitale, porzioni di spazio ove la densità di particelle detritiche è molto maggiore della media: si tratta di fasce (*Streams*) di particelle che incontrano l'orbita terrestre periodicamente. Il risultato è un significativo incremento di impatti di meteoroidi in atmosfera. Questo fenomeno è noto come **Sciame di Meteoroidi**, o più comunemente in letteratura come *Meteor Shower*.

Una **Meteorite Sporadica** (o "*Nonshower Meteorite*") viene definita tale quando non è associabile a nessuno sciame conosciuto. Le Meteorite Sporadiche entrano in atmosfera con continuità lungo tutto l'arco dell'anno, creando una sorta di background (o livello di fondo) di eventi meteoroidici, la cui frequenza risente tuttavia di variazioni giornaliere e stagionali.

Il flusso meteoroidico totale è determinato dal contributo sia delle meteorite di sciame che delle meteorite sporadiche; se un dato giorno dell'anno un determinato sciame è attivo, il relativo flusso meteoroidico va a sovrapporsi a quello delle meteorite sporadiche.

Quindi, i *Meteor Rates* (il numero di meteorite rilevabili da un osservatore in un determinato intervallo di tempo) è la somma dei rates relativi alle meteorite sporadiche e dei rates associati ad uno sciame (qualora ve ne sia uno attivo in quel momento). In presenza di più di uno sciame attivo, i rates totali saranno la somma dei meteor rates relativi a ciascuno sciame, più i rates associati alle sporadiche (Vds Figg. 1 e 2).

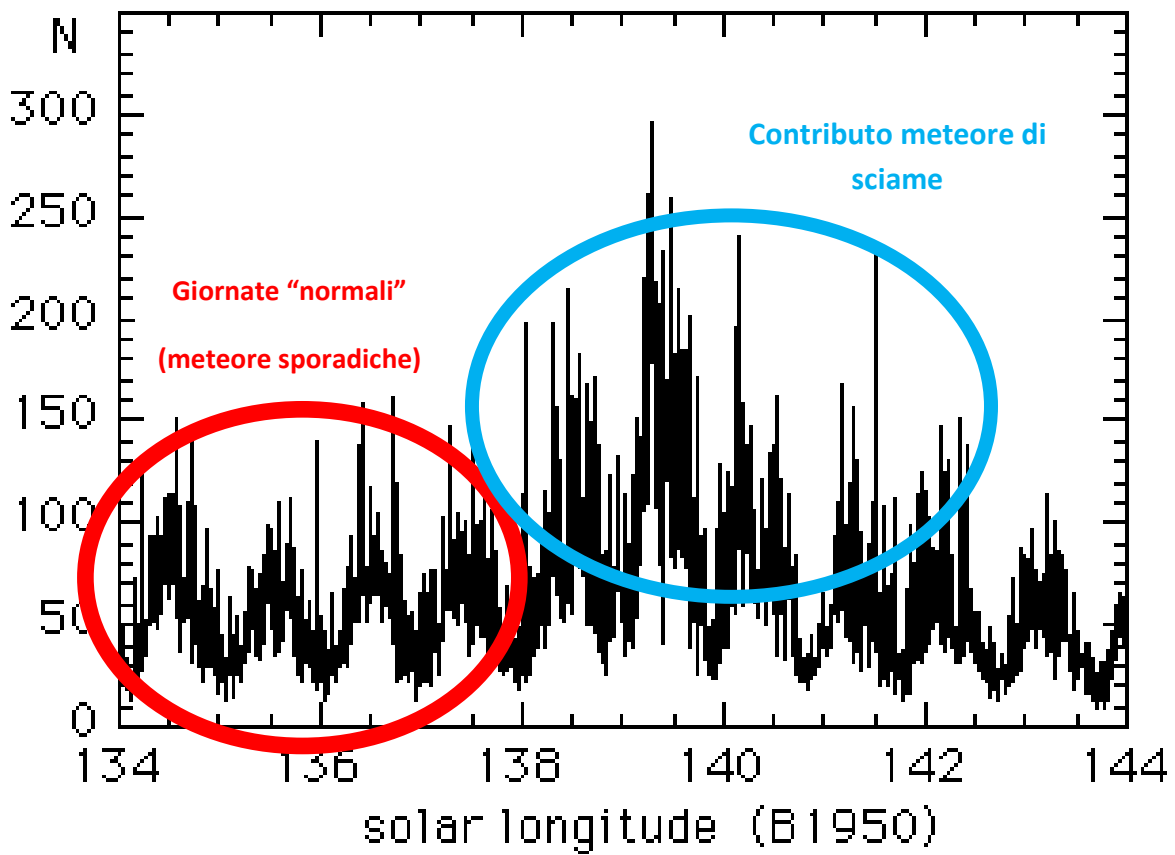


Fig. 1 Sciame di meteore sovrapposto all'attività meteorica giornaliera (meteore sporadiche) [2]

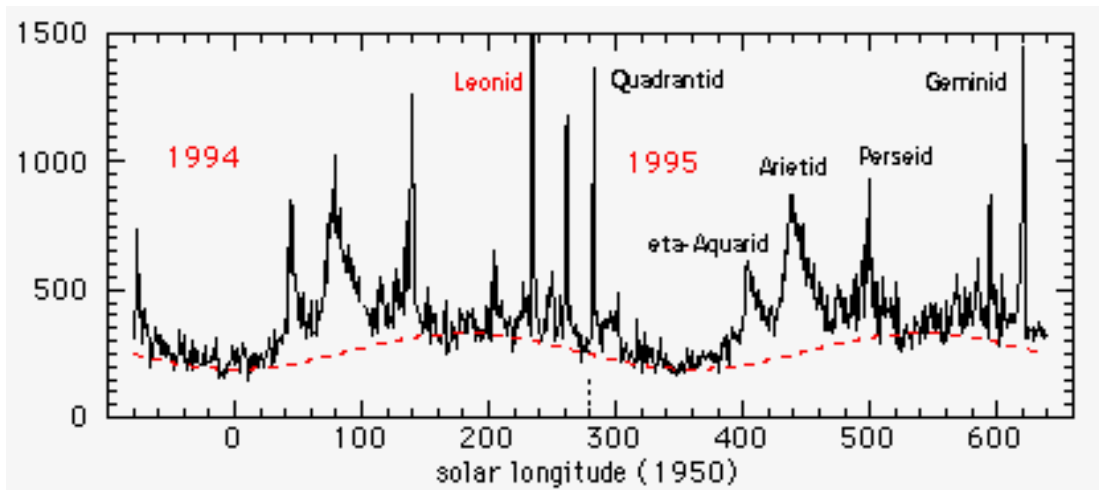


Fig. 2 Attività degli sciame annuali sovrapposta all'attività meteorica di fondo; si noti la variazione stagionale del rate di meteore sporadiche (curva tratteggiata rossa) [2]

Il **Radiante** di una meteora è il punto in cui il percorso della meteora interseca la volta celeste; è quindi il punto del cielo da cui la meteora appare provenire. La definizione può essere estesa agli sciame meteoritici, in quanto le meteore di sciame, pur attraversando il cielo in tutte le direzioni, paiono provenire tutte da uno stesso punto, o areola di estensione limitata. I loro percorsi, estrapolati all'indietro, paiono originarsi quindi in un punto comune, detto **Radiante dello Sciame**. L'origine delle tracce in punto comune è dovuto ad un effetto prospettico, in quanto in realtà tutte le meteore appartenenti allo sciame si muovono lungo percorsi paralleli.

Meteore Sporadiche

Di base, vi sono 6 sorgenti conosciute di attività meteorica sporadica, corrispondenti ad altrettante zone della volta celeste: Apice Settentrionale e Meridionale, Sole, Antisole, Toroidale Settentrionale e Meridionale.

L'Apice dell'orbita terrestre è il punto della volta celeste verso cui la Terra appare muoversi, istante per istante.

Le sorgenti agli Apici derivano da meteore che impattano "frontalmente" l'atmosfera terrestre durante il moto del nostro pianeta nello spazio.

Le sorgenti meteoriche agli Apici sono caratterizzate da un doppio radiante, posizionato 15 gradi a nord e 15 gradi a sud dell'Eclittica (= il piano contenente l'orbita terrestre), a 90 gradi ovest rispetto al Sole.

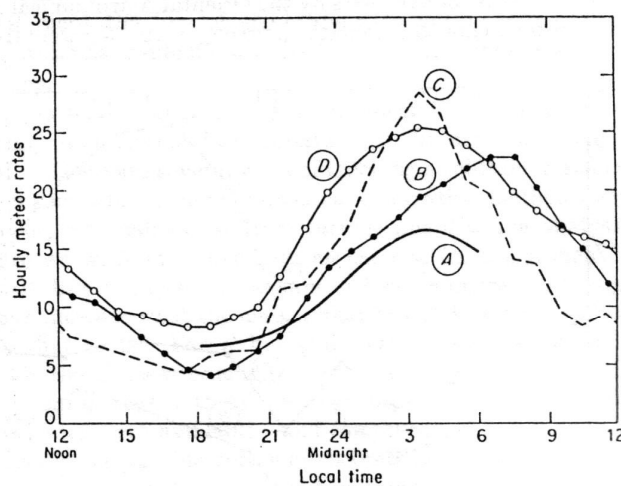
Dal momento che noi siamo in grado di osservare meteore (a prescindere dalla tecnica osservativa utilizzata) solo se il relativo radiante è al di sopra dell'orizzonte dell'osservatore, le Sporadiche provenienti da una sorgente di Apice sono rilevabili solo dopo il sorgere del corrispondente radiante (dopo la mezzanotte locale). Il relativo rate massimo è di primo mattino (ora locale dell'osservatore) quando i radianti raggiungono la massima elevazione nel cielo dell'osservatore.

Siccome le meteore provenienti dalle sorgenti di Apice giocano un ruolo significativo nel determinare il flusso meteorico totale, si comprende perchè il rate di Sporadiche è massimo nelle ore del mattino. Immaginiamo infatti la Terra come una palla lanciata in un ambiente con polvere in sospensione. La maggior parte degli impatti tra palla e particelle di polvere avvengono, ovviamente, nella superficie frontale della palla (la superficie orientata nel verso di avanzamento della palla stessa), piuttosto che sulla superficie opposta.

A causa della rotazione della Terra attorno al proprio asse, un osservatore terrestre si ritroverà sulla superficie diretta nel verso di avanzamento, solo una volta al giorno: proprio nelle ore del mattino (ora locale). In corrispondenza di ciò, si rileverà il massimo del flusso di Sporadiche, per i motivi summenzionati. Va notato inoltre che anche la velocità relativa di impatto tra meteoroidi e atmosfera risulta essere maggiore nella proiezione "frontale" dell'atmosfera. Ciò equivale a dire che anche meteoroidi più piccoli sono in grado di "bruciare" più facilmente, divenendo quindi osservabili; in questo modo il flusso meteorico misurato viene a crescere ulteriormente.

In prima approssimazione, i due fattori principali che influiscono sul flusso meteorico sporadico sono la posizione dell' Apice nel cielo dell'osservatore, e l'effettiva distribuzione di meteoroidi attorno alla Terra. Supponendo una distribuzione omogenea di meteoroidi attorno al nostro pianeta, siccome l'Apice corrisponde alla porzione di atmosfera avente la maggiore probabilità matematica di intercettare meteore (su varie orbite), maggiore l'elevazione del Apice sull'orizzonte dell'osservatore, maggiore è il flusso meteorico di sporadiche.

L'apice raggiunge il punto più elevato (culminazione) di primo mattino (ora locale dell'osservatore) sicchè questo è un modo alternativo di spiegare la variazione giornaliera del rate di sporadiche, avente il massimo appunto nelle ore di primo mattino, ed il minimo nelle ore della prima serata.



The mean daily variation of meteor rates. *Curve A*, nonshower visual observations, based on data from several sources (see text). Use ordinate scale as shown. *Curve B*, backscatter radar observations, 100,000 echoes. Multiply ordinate scale by 50. (NRC, Ottawa.) *Curve C*, backscatter cw observations, 5,800 echoes. Use ordinate scale as shown. (NRC, Ottawa.) *Curve D*, forward-scatter cw observations, 210,000 echoes. Multiply ordinate scale by 2. (Vogan and Campbell, 1957.)

Fig. 3 Variazione giornaliera del flusso di meteore sporadiche [1]

La posizione dell'Apice imprime anche una variazione stagionale al flusso di meteore sporadiche. Per un osservatore nell'emisfero nord, a latitudini maggiori di 23.5°N, il picco annuale di attività di meteore sporadiche cade intorno all'Equinozio d'Autunno (23 Settembre). In questo periodo infatti, l'Apice viene a trovarsi sopra l'orizzonte dell'osservatore per il massimo numero di ore nel corso della giornata. Vien da sè che il corrispondente minimo nel rate di Sporadiche cade ogni anno intorno all'Equinozio di Primavera (21 Marzo).

Viceversa, nell'Emisfero Sud gli osservatori posti a sud di 23.5°S vedranno un massimo annuale del flusso di sporadiche in corrispondenza dell' Equinozio di Primavera, ed un minimo all' Equinozio d'Autunno.

Pertanto, in prima approssimazione, l'andamento del flusso di Sporadiche in funzione del tempo è rappresentabile come sovrapposizione di due curve quasi-sinusoidali: una senoide a breve periodo rappresentante la variazione giornaliera, sovrapposta ad una senoide di lungo periodo, che rappresenta la variazione stagionale (come evidente anche nelle figg. 1 e 2).

In realtà l'effettiva distribuzione dei meteoroidi non risulta omogenea; sia le meteore associabili a sciami che le Sporadiche hanno infatti una densità significativamente maggiore nella seconda metà dell'anno. Tenendo conto anche del contributo degli sciami minori o sconosciuti, l'effettivo massimo annuale del flusso di sporadiche viene a cadere in realtà un pò prima di quanto sopra riportato, nell'emisfero settentrionale. Il massimo annuale di attività delle Sporadiche (nell' Emisfero Nord) è in Luglio-Agosto-Settembre, il minimo in Febbraio-Marzo.

Si noti che i rate di Sporadiche sopra citati si intendono come rate previsti! Usando un approccio statistico, essi possono essere considerati il valore medio rilevato dopo un set di osservazioni nello stesso periodo di anno in anno.

Nella realtà, in una singola osservazione, significative deviazioni dai valori attesi possono essere talvolta riscontrate. Una probabilità alta quanto si vuole, non significa comunque certezza! Lo stesso concetto è applicabile pure agli sciami di meteore. In ogni caso, se le osservazioni sono sufficientemente esaustive, si può verificare che effettivamente i rate di sporadiche convergono verso quanto previsto dal sopracitato modello matematico.

Sciami di meteore

Nel suo moto orbitale, la Terra incontra talvolta fasci di polveri e detriti aventi densità relativamente maggiore rispetto allo spazio circostante. Tali incontri sono in grado di aumentare significativamente il numero di meteore entranti in atmosfera, dando luogo ad un cosiddetto **Sciame di Meteore**.

Gli sciami noti sono centinaia; la maggior parte di essi è costituita tuttavia da sciami minori (se non addirittura dispersi o non più attivi), ovvero caratterizzati da un flusso meteorico distinguibile a fatica da quello associato alle meteore sporadiche. Va detto tuttavia che alcuni spettacolari sciami sono in grado di elevare notevolmente il flusso meteorico in determinati periodi dell'anno, anche di un fattore 100 o superiore rispetto al flusso meteorico di fondo. I detriti associati allo sciame hanno un'origine cometaria. Essi sono infatti stati rilasciati da comete (o anche pianeti minori) durante un passaggio orbitale relativamente vicino al Sole, e successivamente distribuiti lungo l'intera orbita della cometa formando in tal modo un cosiddetto **Meteor Stream**.

Le orbite di questi *Streams* seguono in qualche modo quelle delle comete che li hanno originati; tuttavia, esse possono evolvere in maniera anche molto complicata a causa di effetti gravitazionali. Ad esempio, un passaggio ravvicinato ad un pianeta è in grado di fare accelerare alcuni meteoroidi, come di farne decelerare altri. Il risultato è la formazione di zone a maggiore o minore densità di detriti all'interno dello Stream. L'effetto gravitazionale dei pianeti maggiori (Giove in primis) è inoltre in grado di influire sulla distribuzione di meteoroidi nella sezione trasversale dello Stream.

Tutto ciò sta a significare che il fascio di polveri associato allo sciame risulta essere non omogeneo, sia in una sezione trasversale che longitudinale. Per questo motivo il flusso meteorico di alcuni sciami varia significativamente col tempo, anche nel breve periodo.

La risonanza dell'orbita dello Stream con quella di Giove tende a mantenere i meteoroidi in una determinata posizione relativa rispetto al pianeta; il risultato è una componente dello Stream detta **Filamento**.

Infine, la pressione di irradiazione del sole tende a "soffiare via" le particelle più piccole, lasciando nello Stream solo le particelle di dimensioni e massa maggiore. Ciò spiega perché alcuni sciami sono più ricchi di meteore luminose ed altri di meteore più deboli. Tipicamente, gli streams più "antichi" hanno una prevalenza di meteoroidi di dimensioni maggiori, che danno luogo a meteore più luminose.

Gli Streams meteorici più antichi tendono ad allargarsi, fino a diventare sciami dispersi in virtù della loro densità di polveri troppo bassa. Oltre a ciò, alcuni fasci di polveri non sono più in grado di intersecare l'orbita terrestre a causa di effetti gravitazionali che hanno deviato la loro orbita.

Va notato poi come molti Stream più giovani seguano orbite ellittiche, intersecanti quella della Terra con regolarità, nello stesso periodo ogni anno (**Sciami Annuali**). Altri sciami invece incontrano la Terra con una periodicità maggiore di un anno: sono detti **Sciami Periodici**; il più famoso tra essi è lo sciame delle Leonidi, avente una periodicità di 33 anni.

Tipicamente, uno sciame prende il nome dalla costellazione in cui appare il relativo Radiante. Se più di un Radiante compare all'interno di una costellazione, il nome dello sciame è preceduto dalla designazione (in lettera greca) della stella prominente più vicina al relativo radiante.

Come visto, uno sciame può manifestarsi con caratteristiche molto varie. La sezione trasversale del relativo Stream può avere uno o più nuclei ad alta densità, dando luogo ad uno o più massimi del flusso meteorico nel momento in cui l'orbita della Terra li interseca. Anche la distribuzione di massa dei meteoroidi può variare sia in senso longitudinale che trasversale nello stream. Alcuni sciami esibiscono massimi di flusso molto "larghi", altri hanno un picco di attività molto più "stretto" ed acuto. In alcuni vi è prevalenza di meteore luminose, in altri di meteore molto fievoli, e così via.

Per caratterizzare un determinato sciame di meteore, è stata introdotta una serie di parametri, alcuni dei quali dipendenti dal tempo. Ecco di seguito i più significativi:

Data / Orario del Massimo: in genere è dato in termini di longitudine solare (λ_{sol} , equinox 2000), una misura precisa della posizione della Terra lungo la propria orbita, indipendentemente dal calendario. L'effettiva data del calendario può essere ricavata dalla longitudine solare, tramite opportune tabelle di conversione.

Durata della Sciame: la Durata (in giorni) è la misura dell' "acutezza" del picco di attività; è approssimativamente l'intervallo di tempo in cui l'attività dello sciame supera $1/4$ del suo valore massimo. Va notato che quest'intervallo può anche essere disposto in maniera asimmetrica attorno alla data del picco, dal momento che diversi sciame mostrano, a fronte di una lenta salita dell'attività, un decremento di flusso molto rapido dopo il picco.

Posizione del Radiante: Coordinate celesti (RA, DEC) del Radiante dello sciame, al momento del massimo di attività. Va notato che la posizione del radiante nel cielo presenta un drift (nell'ordine di un grado in Ascensione Retta al giorno) a causa del moto orbitale della Terra attorno al Sole.

Velocità di ingresso geocentrica (V_{∞}): Velocità apparente del meteoroidi all'ingresso in atmosfera. E' data in Km/s e può variare da un minimo di 11 Km/s fino a un massimo di circa 72 Km/s.

Indice di popolazione, r : tiene conto della distribuzione di magnitudine dei meteoroidi dello sciame, ed è in qualche modo legato alla distribuzione di massa dei meteoroidi stessi. Un valore di r compreso tra 2.0 e 2.5 è relativo a meteoroidi più luminosi della media, $r > 3$ è associato a meteoroidi più fievoli della media.

Zenithal Hourly Rate, ZHR: dato in meteore/ora, è definito come il numero massimo di meteore (calcolato) che un osservatore ideale vedrebbe in un cielo completamente pulito, se il radiante dello sciame fosse allo Zenith dell'osservatore stesso.

Un osservatore visuale è in grado di stimare lo ZHR di uno sciame in un determinato periodo, applicando un fattore correttivo al numero di meteore effettivamente osservate. Viene in tal caso tenuta in considerazione l'effettiva elevazione del Radiante dello sciame rispetto all'orizzonte.

Anche un osservatore facente uso di tecniche radio, è in grado di stimare lo ZHR, una volta misurato il **Radio Hourly rate (RHR)** e "scalato" lo stesso tramite una formula, che tiene conto della larghezza di lobo dell'antenna utilizzata e della "Magnitudine Limite" rilevabile dal sistema ricevente.

Lo ZHR è una misura del flusso meteorico, ovvero del numero di meteore osservabili per unità di tempo. Gli sciame minori sono tipicamente caratterizzati da $ZHR < 10$ meteore/ora, mentre gli

sciame maggiori esibiscono valori di ZHR dell'ordine di 100 meteore/ora o anche molto maggiori in caso di *Meteor Storms*.

In alcuni casi, relativamente rari, il flusso meteorico di uno sciame raggiunge valori considerevolmente maggiori (un fattore 2 o superiore) rispetto al proprio livello normale di attività annuale. Questo fenomeno, noto come **Outburst**, dà luogo nei casi migliori a vere e proprie tempeste di meteore.

Dati relativi ai 5 sciame maggiori dell'anno:

Quadrantids (Bootids)

Parent objects: Minor planet 2003 EH1, comets C/1490 Y1 and C/1385 U1

$\lambda_{sol,max} = 283^{\circ}16$ (beginning of January)

Duration of peak = 0.5 days

Radiant (RA,DEC) = 230° , $+49^{\circ}$

$V_{\infty} = 41$ Km/s $r = 2.1$, ZHR_{typ} = 120 hr⁻¹

η - Aquarids

Parent comet: 1P/ Halley

$\lambda_{sol,max} = 45^{\circ}5$ (beginning of May)

Duration of peak = 10 days

Radiant (RA,DEC) = 338° , -1°

$V_{\infty} = 66$ Km/s $r = 2.4$, ZHR_{typ} = 70 hr⁻¹

Arietids (Daytime shower)

Parent comet: 96P/ Machholz

$\lambda_{sol,max} = 76^{\circ}7$ (early June)

Duration of peak = 20 days

Radiant (RA,DEC) = 44° , $+24^{\circ}$

$V_{\infty} = 38$ Km/s, ZHR_{typ} = 60 hr⁻¹

Perseids

Parent comet: 109P/ Swift-Tuttle

$\lambda_{sol,max} = 140^{\circ}0$ (mid August)

Duration of peak = 5 days

Radiant (RA,DEC) = 46° , $+58^{\circ}$

$V_{\infty} = 59$ Km/s, $r = 2.6$ ZHR_{typ} = 100 hr⁻¹

Geminids

Parent object: Minor Planet 3200 Phaeton

$\lambda_{sol,max} = 262^{\circ}2$ (mid December)

Duration of peak = 6 days

Radiant (RA,DEC) = 112° , $+33^{\circ}$

$V_{\infty} = 35$ Km/s, $r = 2.6$ ZHR_{typ} = 120 hr⁻¹

Teoria degli echi radio

All'ingresso del meteoroido in atmosfera, la sua energia cinetica si trasforma in calore, emissione luminosa e ionizzazione, a causa delle collisioni con le particelle di gas circostanti. Gli atomi del meteoroido lasciano quest'ultimo per vaporizzazione dalla superficie, nel corso di un processo detto di **Ablazione**.

Durante l' Ablazione, gli atomi del meteoroido e dei gas circostanti ionizzano, creando una scia di ioni ed elettroni liberi. Queste particelle cariche sono responsabili dei meccanismi di diffusione / riflessione di onde radio incidenti la scia ionizzata.

Il campo elettrico dell'onda incidente fa vibrare le particelle cariche, ed è noto che particelle cariche oscillanti emettono onde elettromagnetiche. L'energia associata all'onda radio incidente viene quindi ri-emessa in tutte le direzioni.

Teoricamente, sia gli ioni che gli elettroni nella scia contribuiscono all'onda diffusa. Tuttavia gli ioni sono troppo pesanti per dare un contributo significativo, specialmente alle alte frequenze, per cui solo gli elettroni liberi vengono presi in considerazione in questo contesto.

Questo meccanismo permette (utilizzando tecniche adeguate) contatti radio a lunga distanza anche in casi in cui il link radio non è normalmente possibile, a causa della curvatura della superficie terrestre e/o della mancanza di altre forme propagative.

Lo stesso meccanismo permette, agli osservatori nello spettro radio, di rilevare l'ingresso di un meteoroido in atmosfera. Sintonizzando infatti un ricevitore su una frequenza ove è noto esserci un trasmettitore distante e normalmente non ricevibile, l'arrivo di un meteoroido è contrassegnato da un breve intervallo di tempo in cui siamo in grado di ricevere il segnale del trasmettitore. Va notato che buona parte della ricerca scientifica sulle meteore si basa sull'uso di radar e sull'analisi di echi di back-scatter provenienti da tracce di meteore.

La durata dell'eco è tipicamente breve, nonchè dipendente dalla geometria e dalla frequenza: si va da frazioni di secondo fino a minuti nei casi migliori. Il segnale subisce una diffusione (Scattering) fintantochè la densità di elettroni liberi nella scia rimane sufficientemente elevata, in relazione alla frequenza operativa di interesse, per supportare i fenomeni di diffusione / riflessione.

Va notato che la densità di elettroni liberi decresce rispetto al tempo, prevalentemente a causa del meccanismo di diffusione e ricombinazione di elettroni e ioni.

L'eventualità di un fenomeno di riflessione dipende dalla densità di elettroni liberi nella scia; in quest'ottica, analizzeremo due casi estremi (Tracce Iperdense e Ipodense), tenendo presente che una traccia meteorica può essere vista sempre come un caso intermedio tra i due citati.

Scie Ipodense: sono prodotte dai meteoroidi di dimensioni più piccole. In quest'approssimazione, la densità di elettroni liberi è così bassa che l'onda incidente può penetrare nel volume ionizzato senza attenuazione. Ciascun elettrone produce individualmente

uno scattering sull'onda incidente; il segnale complessivo ricevibile grazie alla traccia ionizzata è la somma di tutti i contributi di scattering dovuti ai singoli elettroni, tenendo in debito conto la fase di ciascun segnale.

Avviene, in questo caso, un meccanismo di **Diffusione (Scattering) puro**. L'eco risultante viene in gergo denominato **Ping**.

Il principale contributo allo Scattering ha luogo nel volume ove la densità elettronica è maggiore (la "testa" della meteora e il nucleo della scia ionizzata). La potenza ricevuta risultante, tra i vari fattori, è dipendente dalla posizione ed orientamento della traccia, nonché dalla lunghezza d'onda (la potenza ricevuta cresce notevolmente al decrescere della frequenza, così come la durata dell'eco).

In qualunque istante, gli elettroni liberi sono caratterizzati da una densità avente una distribuzione circolare gaussiana, centrata attorno al percorso del meteoroido.

Immediatamente dopo la formazione della scia, ioni ed elettroni iniziano a diffondersi nell'atmosfera circostante, diminuendo così la densità volumetrica di carica.

Al crescere del raggio della scia (a causa della citata diffusione) si viene a perdere la coerenza di fase tra i vari contributi di scattering: per questo motivo la potenza totale ricevuta decresce rispetto al tempo, con legge esponenziale.

Meteoroidi relativamente piccoli e veloci tendono a subire l'ablazione a quote più alte, ove la densità atmosferica è sufficientemente bassa da permettere al raggio della scia di crescere con rapidità; per questo motivo essi danno luogo ad echi più deboli e brevi.

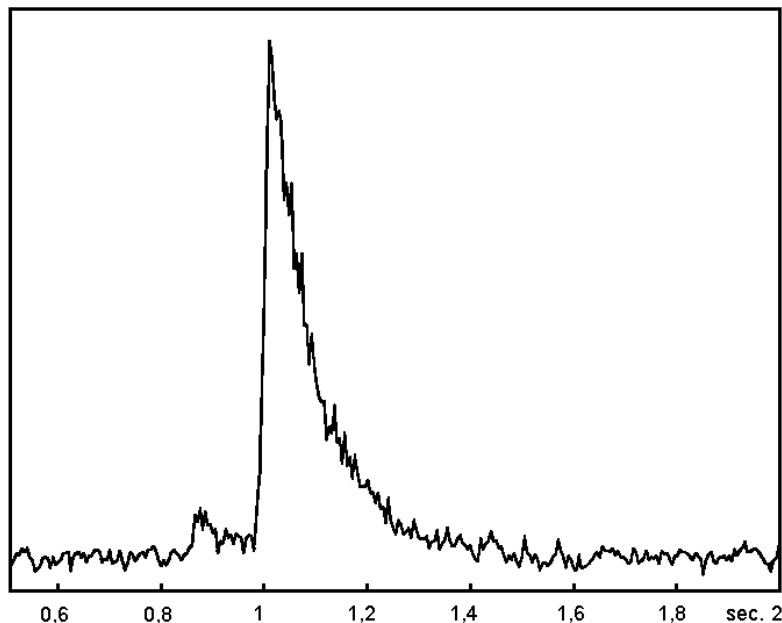


Fig. 4 Profilo nel tempo di un eco ipodenso (Ping) [3]

Il tipico profilo (Potenza ricevuta in funzione del tempo) di un eco da meteora ipodensa è caratterizzato da un rapido fronte di salita e da una discesa con decadimento esponenziale (vds

Fig.4). Il tempo di salita porta informazioni sulla velocità del meteoroido, mentre la discesa con legge esponenziale è il risultato della diffusione della scia ionizzata in atmosfera: la costante di tempo e il decay time sono legati alla densità di particelle di gas in atmosfera, di conseguenza all'altitudine del volume ionizzato. Maggiore la quota del punto di ablazione, più rapido è il decadimento esponenziale e più breve l'eco.

Scie Iperdense: sono prodotte dai meteoroidi di dimensioni maggiori. Quando la densità di elettroni liberi è elevata, il nucleo della scia si comporta come un plasma. Le onde radio non sono quindi più in grado di traversare il nucleo della scia, e subiscono il fenomeno dello scattering. La scia meteorica è però ora approssimabile a un cilindro metallico: le onde radio possono raggiungere la superficie del cilindro senza attenuazione, e sono riflesse dal cilindro stesso. Immaginando la scia come un assieme di cilindri concentrici, caratterizzati ognuno da una densità elettronica crescente spostandosi verso il nucleo della traccia, si verificherà un fenomeno di riflessione totale sul cilindro avente densità di ionizzazione superiore ad una precisa *Densità Critica*, (funzione della frequenza).

Si viene in tal caso a verificare una **Riflessione Speculare**. L'eco risultante è noto come **Burst**; la relativa potenza ricevuta è, ancora una volta, fortemente dipendente da posizione ed orientamento della scia, nonché dalla frequenza (a frequenze più basse corrispondono potenze ricevute maggiori).

Il profilo tipico dell'eco iperdenso può essere spiegato sulla base del fenomeno di Interferenza. Pochi Km di scia effettivamente contribuiscono al segnale riflesso (è quindi più appropriato parlare di sezione riflettente più che di punto di riflessione). Le onde sono riflesse da diverse aree nella scia, ma un'interferenza costruttiva avviene solo nella direzione prevista dall'ottica geometrica. Il segnale riflesso principale (ovvero quello col minimo percorso ottico) andrà ad interferire con i segnali riflessi da aree più distanti (aventi quindi ampiezze e fasi differenti). In questo modo si vengono a definire zone ad interferenza costruttiva o distruttiva col segnale riflesso principale, dette *Zone di Fresnel* (fig. 5).

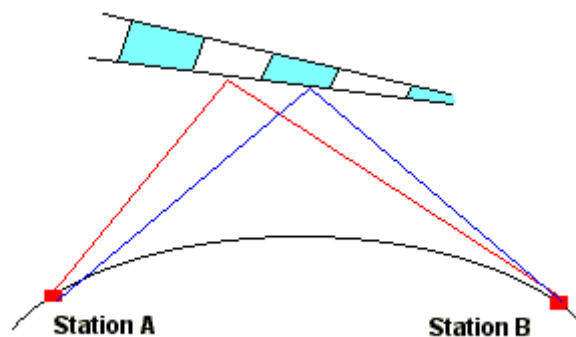


Fig. 5 Fenomeno di interferenza sulle scie Iperdense

Durante il tragitto del meteoroido, si vengono a formare zone della scia alternativamente costruttive e distruttive, dando così luogo al caratteristico “Ripple” sul profilo dell’eco. Se la geometria della riflessione è completamente nota, la periodicità del *Ripple* può essere utilizzata per determinare la velocità del meteoroido. Un’altra tecnica per misurare la velocità della meteora (anche in questo caso, una volta nota in tutto e per tutto la geometria della riflessione) si basa sull’analisi dello shift di frequenza per effetto Doppler, spesso riscontrato sul cosiddetto *Eco di Testa* della riflessione (fig. 6).

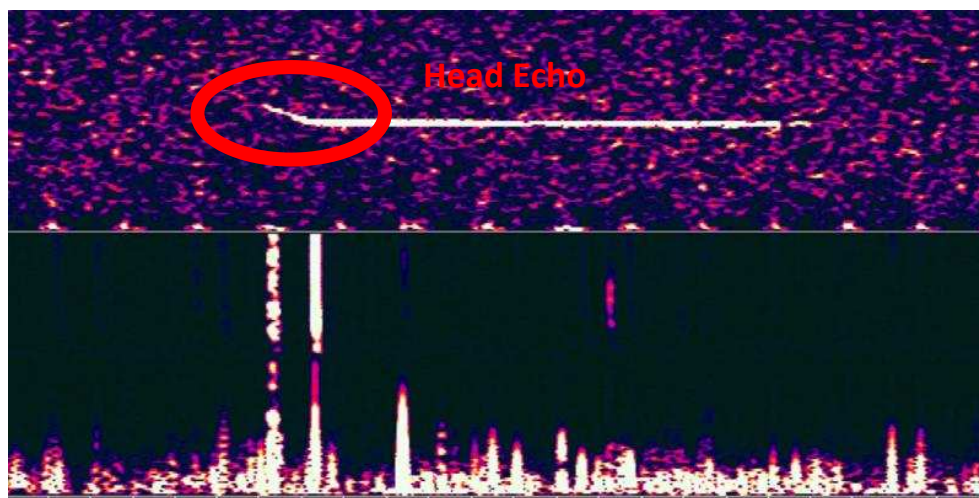


Fig. 6 Eco meteorico nel dominio della frequenza, con evidenziato l’ “Eco di testa”

A causa della successiva diffusione degli elettroni della scia, il raggio del nucleo iperdenso aumenta col tempo (il che tende ad aumentare la potenza riflessa). Al tempo stesso però, la densità centrale della scia diminuisce, il che porta per contro a restringere il raggio della parte iperdenso. Alla fine, la parte iperdenso viene a scomparire, e rimane solo una voluminosa scia ipodensa.

Come risultato, il profilo di un eco iperdenso breve è caratterizzato da un fronte di salita rapido e da una successiva salita lenta (a causa del processo di diffusione elettronica), con sovrapposto un ripple; segue una discesa (quando la densità elettronica tende ad essere troppo bassa). Una volta che il nucleo iperdenso della traccia è svanito, si verifica un decadimento esponenziale del profilo, tipico degli echi ipodensi (Fig. 7).

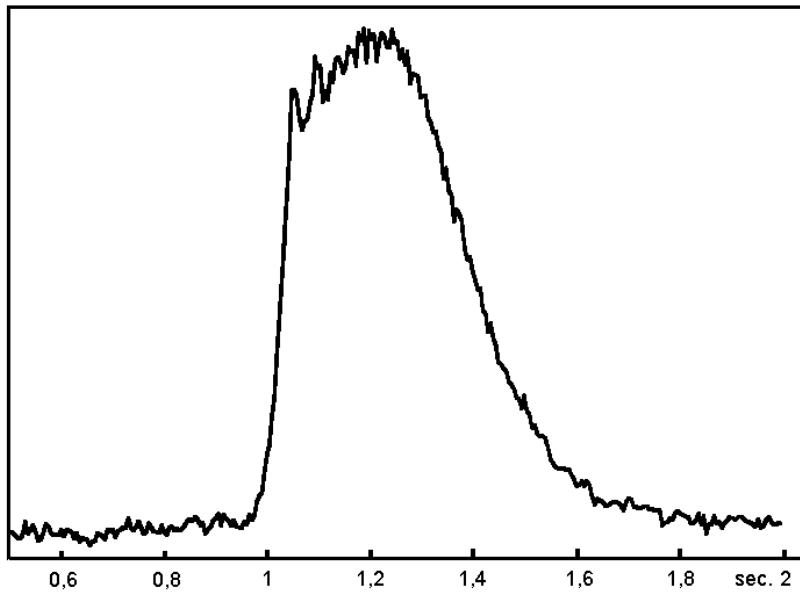


Fig. 7 Profilo nel tempo di un eco iperdenso breve (Burst) [3]

In caso di echi iperdenso di lunga durata, si riscontrano spesso forti oscillazioni della potenza ricevuta. Ciò è causato dalle distorsioni subite dalla scia ionizzata a causa dei venti dell'alta atmosfera. Come conseguenza, sulla scia compaiono più aree riflettenti, che danno luogo a contributi interferenti tra loro. Essendo le aree riflettenti non stazionarie per l'azione dei venti, le condizioni di interferenza cambiano continuamente, originando così un profondo e in genere rapido Fading sul segnale ricevuto (fig. 8).

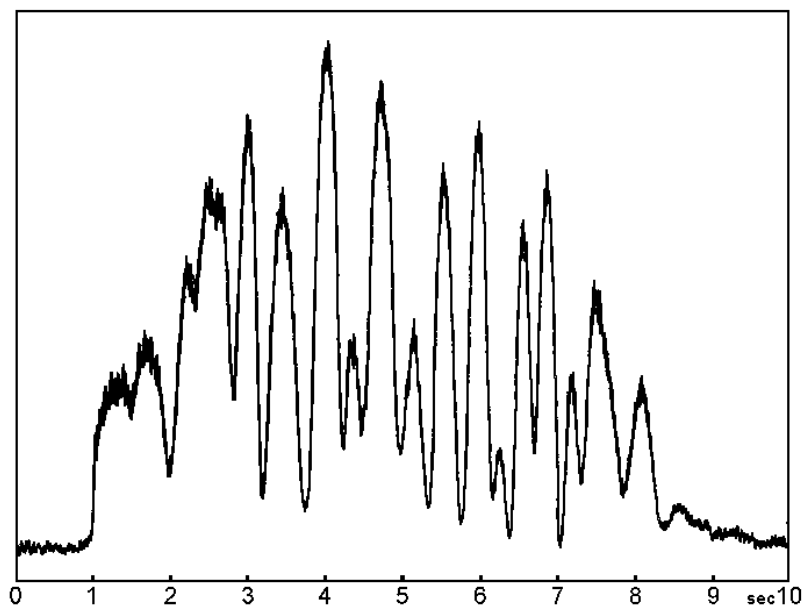


Fig. 8 Profilo temporale di un eco iperdenso di lunga durata [3]

Questo fenomeno si verifica solamente sui Burst di maggiore durata; gli echi iperdensi brevi sono invece caratterizzati da una durata che, in prima approssimazione, è proporzionale al quadrato della lunghezza d'onda del segnale incidente.

Ciò significa, ad esempio, che una meteora iperdensa in grado di dare un eco di 1 secondo di durata sui 144 MHz, darà luogo ad una durata di circa 10 s sui 50 MHz, e di circa 0.1 s sui 432 MHz.

In ogni caso, anche la geometria dello scattering va tenuta in considerazione per determinare la potenza ricevuta e la durata dell'eco.

Considerazioni sulla geometria del MS

Come visto, una meteora è in grado di diffondere un'onda radio incidente la relativa scia ionizzata. Tuttavia, prendendo in considerazione la posizione relativa della scia rispetto al trasmettitore e ricevitore, va notato che non sempre una meteora è in grado di riflettere onde radio verso il ricevitore. Le scie meteoriche debbono soddisfare precisi requisiti di natura geometrica per poter essere utilizzabili in un link radio.

Dal momento che le riflessioni speculari sono governate dal principio di Fermat (o del percorso ottico minimo) **una meteora può produrre uno scattering di un onda incidente verso il ricevitore, solo se la sua traccia ionizzata è tangente ad un ellissoide, avente il trasmettitore ed il ricevitore come fuochi.** Le meteore che non soddisfano questa condizione, non verranno "viste" dal sistema radio (vds Fig.9).

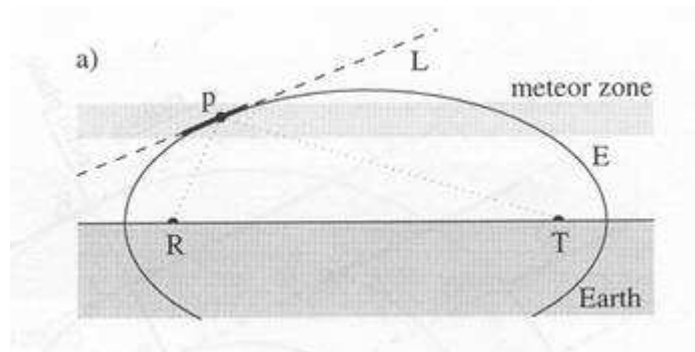


Fig.9 Condizioni geometriche per un eco meteorico tra T e R [3]

A seconda della posizione relativa del volume di scattering rispetto al ricevitore e trasmettitore, si possono avere echi in Forward Scatter, Back Scatter e Side Scatter. Immaginando di proiettare il volume di scatter su un piano "orizzontale" contenente il ricevitore ed il trasmettitore, se l'angolo β tra il raggio incidente e la direzione del raggio diffuso/riflesso è prossima a 0° , siamo in condizioni di Forward Scatter. Se $\beta < 90^\circ$ siamo in condizioni di Side Scatter, di Back Scatter con $\beta > 90^\circ$ (fig. 10).

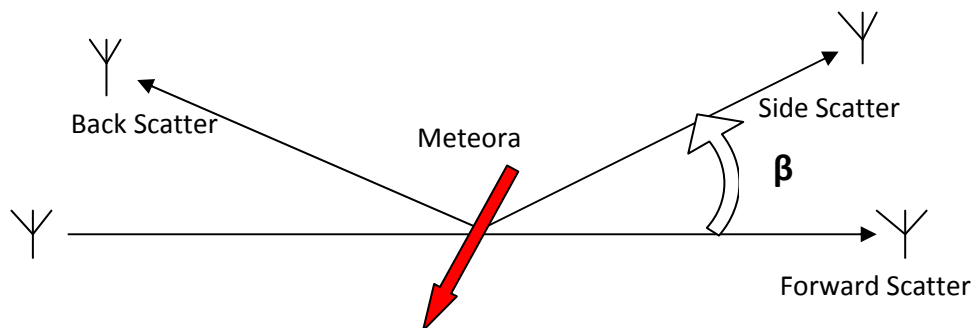


Fig. 10 Tipologie di scattering in funzione della posizione reciproca tra trasmettitore e ricevitore

Una teoria generale ed un modello matematico, da cui i meccanismi di Forward / Side / Back Scatter possono essere desunti come casi particolari, è stata a suo tempo sviluppata, ma la relativa trattazione esula dagli scopi di questo testo.

La condizione di Forward Scatter è considerata la migliore per le osservazioni delle meteore con tecniche radio. Rispetto alle tecniche facenti uso del Back Scatter, permette di osservare meteore decisamente più deboli e a quote più elevate. Nei collegamenti radio ciò si traduce in un numero di echi più elevato e con segnali in gioco più intensi.

Va notato che, in presenza di una distribuzione uniforme del radiante (meteore sporadiche), la densità di durata relativa degli echi presenta due massimi, corrispondenti a due aree dette "Hot Spots". Esse sono dislocate a metà della tratta congiungente le due stazioni, su ciascun lato del midpoint della tratta stessa. Per "illuminare" una di queste aree sarà quindi necessario un offset di puntamento (rispetto alla direzione forward) da parte dell'antenna. Questo offset è tuttavia significativo solo se la distanza tra ricevitore e trasmettitore è relativamente breve. In tal caso, il puntamento di un Hot Spot comune equivale a ricercare le condizioni ottimali di Side Scatter.

Se la distanza tra le due stazioni è maggiore di circa 1000 Km, una tipica antenna direttiva in banda VHF ha un lobo principale sufficientemente largo da includere entrambi gli Hot Spots nel Main Lobe, pur puntando semplicemente nella direzione Forward. Ciò equivale a dire che nella maggior parte dei casi, i risultati migliori si ottengono semplicemente puntando nella direzione della congiungente le due stazioni.

Le meteore subiscono il processo di ablazione prevalentemente nella regione E della Ionosfera, attorno ai 100 Km di quota. Per ogni sciame, si possono definire delle distribuzioni normalizzate delle quote di ablazione (Percentuali di echi in funzione della Quota). Si tratta di curve di tipo gaussiano, tipicamente centrate attorno ad un valore di quota di 95-100 Km. La quota di ablazione, assieme ad altri parametri geometrici e le caratteristiche delle stazioni riceventi/trasmittenti (in primis i diagrammi di irradiazione delle rispettive antenne) influenza la massima distanza copribile in un collegamento radio via MS. Ad esempio, in banda 144 MHz la

minima distanza per il MS "Forward" è intorno ai 700 Km, la massima intorno ai 2200 Km, con un a distanza ottimale intorno ai 1300 Km.

La condizione generale per il verificarsi del forward scattering è che l'angolo tra il raggio incidente e la scia ionizzata sia uguale all'angolo tra la scia stessa ed il raggio riflesso. I raggi riflessi che soddisfano questa condizione, giacciono su un cono avente la direzione della scia meteorica come asse (vds Fig.11).

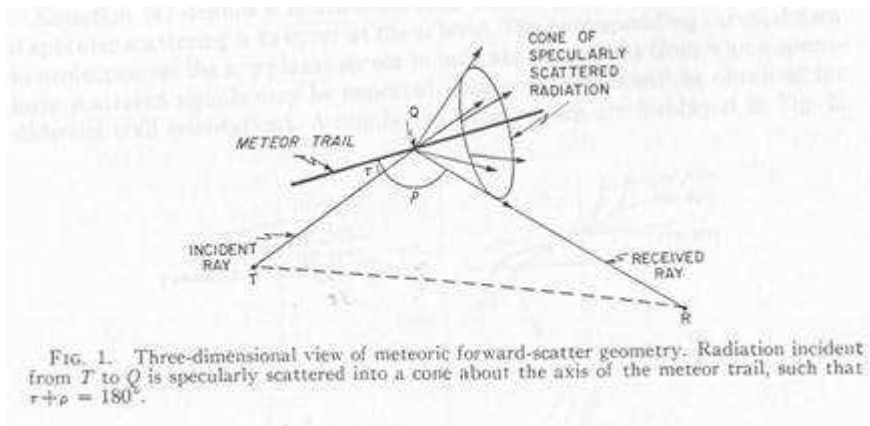


Fig. 11 Cono di scattering da una scia meteorica [4]

Prendendo in considerazione la sezione trasversale di scattering della scia, nonché la modalità con cui essa reirradia (si può infatti definire un pattern di reirradiazione, dipendente dalla polarizzazione dell'onda incidente), i raggi delle onde diffuse intersecano la superficie terrestre illuminando un'area specifica, detta **Footprint** dell'eco meteorico.

La forma di quest'area dipende da vari fattori (perlopiù geometrici) mentre la sua estensione è, tipicamente, relativamente limitata (anche meno di 100 Km^2).

Ciò significa che due diverse stazioni riceventi potrebbero non essere in grado di ricevere lo stesso eco meteorico, anche se distanti tra loro solo pochi Km.

Per gli sciami di meteore, la posizione del radiante gioca un ruolo primario nel determinare il flusso meteorico che ci si può attendere in ambito MS. La "risposta del sistema" ad un determinato sciame è funzione dell'elevazione e posizione relativa del radiante, rispetto alla direzione della congiungente Rx-Tx. Può essere pertanto definita una **Funzione di Osservabilità**, per un dato sciame ed una data direzione Rx-Tx. L' Osservabilità è una misura dell' "efficienza" dello sciame nel fornire meteore con la geometria adeguata per il collegamento radio su una determinata tratta; il tutto, in funzione del tempo.

Un esempio di tale funzione è riportato in Fig. 12.

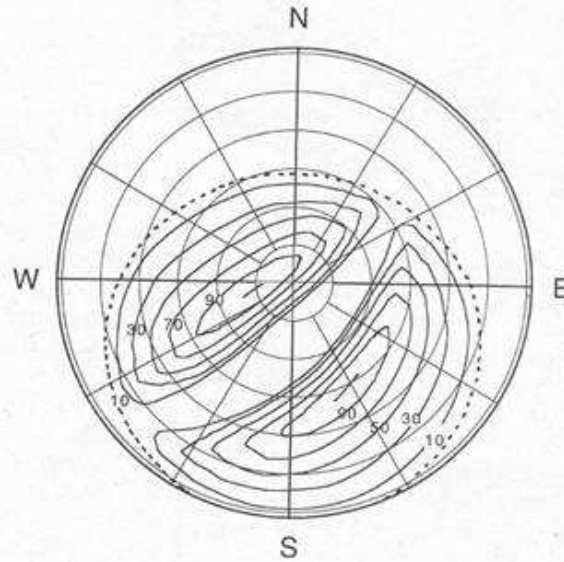


Fig. 4. Observability function for meteors with a radiant at given hour angle and declination for a receiver-transmitter azimuth of 45 degree, a distance of 1300 km, and a midpoint at latitude 57 N - after Hines (1955) and Moorcroft & Hines (1958).

Fig. 12 Rappresentazione grafica di funzione di osservabilità su una tratta radio definita [2]

La funzione di osservabilità è dovuta alla combinazione di diversi effetti. Dipende dall'area di scattering vista sia dal trasmettitore che dal ricevitore, e dalla cosiddetta Funzione di Illuminazione (combinazione dei diagrammi di irradiazione di Rx e Tx). Vi è inoltre una dipendenza dalla latitudine del midpoint della tratta radio. In ogni caso, i termini di maggior peso nella funzione di osservabilità dipendono dalle coordinate (Azimut, Elevation) del radiante rispetto alle location di trasmettitore e ricevitore.

Entrambe le coordinate (Az, El) del Radiante variano rispetto al tempo nel cielo dell'osservatore, visto che nel corso di una giornata, a causa della rotazione della Terra attorno al proprio asse, il radiante si muove a velocità costante lungo un percorso circolare a declinazione costante, attorno al polo nord celeste. Il valore della funzione di osservabilità varierà di conseguenza in funzione del tempo nel corso della giornata; in prima approssimazione la funzione di osservabilità ha una periodicità di 24 ore.

A proposito dell'elevazione del radiante sull'orizzonte, è stato dimostrato (sia matematicamente che sperimentalmente) che il massimo dell'osservabilità nello spettro radio è ottenibile con elevazioni del radiante comprese tra 40 e 50 gradi sull'orizzonte. L'effettivo valore di di elevazione per la massima osservabilità dipende dai diagrammi di irradiazione delle antenne riceventi e trasmettenti coinvolte.

Il valore della funzione di osservabilità di un dato sciame (e con esso il flusso meteorico associato) diminuisce quando il radiante è troppo basso (o troppo alto) rispetto l'orizzonte. Naturalmente, il valore delle funzione di osservabilità è zero quando il radiante dello sciame è sotto l'orizzonte. Con orizzonte in genere si intende, per semplicità, l'orizzonte locale dell'osservatore, anche se sarebbe più corretto ragionare in termini di elevazione del radiante al midpoint della tratta.

Per quanto riguarda la dipendenza della funzione di osservabilità dalla coordinata di Azimut del radiante, in prima approssimazione la funzione di osservabilità raggiunge il massimo quando la direzione osservatore-radiante è ortogonale alla direzione della congiungente ricevitore – trasmettitore. Proiettando il tutto su un piano, ciò significa che la scia meteorica, proveniente dal radiante, risulta essere ortogonale alla congiungente Rx-Tx.

In altre parole, la direzione di massima efficienza radio per un dato sciame è sempre ruotata di 90 gradi rispetto alla direzione del relativo radiante. Per esempio, un collegamento in direzione Nord-Sud godrà delle migliori condizioni di efficienza quando il radiante si trova in direzione Est (o Ovest) rispetto l'osservatore.

L'influenza della coordinata di Azimut del Radiante è particolarmente significativa nella modulazione del flusso di meteore più deboli. Per contro, le meteore più luminose, a causa della formazione di volumi di scatter distorti (detti a seconda dei casi "Glints" o "Blobs") all'interno della scia iperdensa, danno luogo ad echi in qualche modo meno dipendenti dalla geometria e dal percorso della scia. In tal caso l'efficienza geometrica dipende prevalentemente dall'elevazione del radiante.

Va ricordato che l'osservabilità radio non è una misura dell'effettiva attività meteorica dello sciame! L'attività è determinata solamente dalla distribuzione di meteoroidi all'interno dello *Stream*. L'osservabilità è una misura di quanto un osservatore può essere in grado di rilevare meteore di un determinato sciame, a prescindere da quante meteore di detto sciame stanno effettivamente entrando in atmosfera.

L'osservabilità radio può quindi essere usata per ricavare l'effettiva attività meteorica di un determinato sciame. Una volta misurato il Radio Hourly Rate, ed effettuata la riduzione dei dati (correzione per echi sovrapposti, estrazione del background stimato di meteore sporadiche), i rimanenti "echi di sciame" possono essere moltiplicati per l'inverso della funzione di osservabilità in un determinato istante di tempo, per ottenere una stima dell'effettivo flusso meteorico associabile allo sciame, nello stesso intervallo di tempo.

Bibliografia

- [1] McKinley D.W.R, "Meteor Science and Engineering", McGraw-Hill 1961
- [2] Yrjola I., Jenniskens P., "Meteor Stream Activity. A survey of annual meteor activity by means of forward meteor scattering", *Astronomy and Astrophysics* 330, 739-752 (1998)
- [3] Wislez J.M, "Forward scattering of radio waves off meteor trails", *Proceedings of the International Meteor Conference, Brandenburg 1995*, edited by Paul Roggemans and André Knöfel, International Meteor Organization, 1995, pp. 99-117.
- [4] Hines, C.O. "Diurnal variations in the number of Shower Meteors detected by the Forward Scattering of Radio Waves – Part III: Ellipsoidal Theory", *Canadian Journal of Physics*, Vol. 36, pp. 117-126, 1958
- [5] "Handbook for Meteor Observers", edited by Jurgen Rendtel and Rainer Arlt, International Meteor Organization, 2008
- [6] Jenniskens P., "Meteor Showers and their Parent Comets", Cambridge University Press, 2006
- [7] Lunsford R, "Sporadic Meteors"
<http://www.spaceweather.com/meteoroutlook/sporadics.html>
- [8] IMO Website: <http://www.imo.net>
- [9] RMOB Website: <http://visualrmob.free.fr/index.ph>
- [10] MMonVHF Website: <http://www.mmonvhf.de/ms.php>