

OSSERVAZIONE DELLE METEORE CON I RADIO ECHI

Osservatorio Astronomico Urania

Introduzione

Si stima che ogni giorno la terra sia investita da oltre 100 milioni di meteoroidi, con masse in grammi variabili da $10^{\text{exp}-10}$ a $10^{\text{exp}+3}$, che provocano l'arrivo di circa 6.000 tonnellate di polveri spaziali sul nostro pianeta. I meteoroidi derivano per buona parte dalla dissoluzione dei nuclei delle comete, dalle collisioni che avvengono nella fascia degli asteroidi, e in piccola parte provengono dallo spazio esterno al sistema solare. Quando raggiungono l'atmosfera terrestre, le velocità eliocentriche possono raggiungere i 42 Km/s, che è il limite di velocità parabolica ad 1 UA dal sole, o anche superiore per i meteoroidi provenienti dallo spazio esterno. La velocità geocentrica che osserviamo è la somma vettoriale della velocità eliocentrica con la velocità della terra sulla sua orbita (30 Km/s). Perciò al mattino, quando l'osservatore è rivolto verso l'apice del moto della terra, la velocità osservata può arrivare a 72 Km/s e alla sera scendere fino a 12 Km/s. Le particelle che derivano dalla dissoluzione dei nuclei cometari si disperdono lungo l'orbita originaria per l'azione gravitazionale dei pianeti maggiori, e per l'effetto della pressione della radiazione solare che ne riduce il momento angolare, facendole avvicinare progressivamente al sole (effetto Poynting-Robertson). Per questo motivo, i meteoroidi sono per la maggior parte raggruppati in centinaia di "sciami" diversi, che percorrono le orbite delle comete originarie. Quando la terra nel suo moto orbitale interseca questi flussi di particelle, si manifestano le cosiddette "piogge di meteore", in cui tutte le particelle seguono la medesima direzione, e, per un effetto prospettico, all'osservatore sembrano provenire da un unico punto della volta celeste, detto "radiante". I meteoroidi che non sono associati alle comete generano le meteore sporadiche, che hanno un andamento giornaliero, massimo all'alba e minimo al tramonto, e variazioni stagionali agli equinozi. Le tracce meteoriche, o più comunemente meteore, si formano nell'alta atmosfera tra 150 e 50 Km di altezza, e in particolare nello strato E della ionosfera. All'ingresso nell'atmosfera le particelle vaporizzano con un processo di ablazione, e trasformano l'energia cinetica in radiazione luminosa e in calore, generando nei gas atmosferici una scia di plasma (ioni ed elettroni liberi), ovvero la traccia luminosa che osserviamo. Le tracce meteoriche hanno la proprietà, per noi di grande interesse, di riflettere le onde radio che incidono su di esse, in particolare nella parte inferiore della banda VHF (30 – 150 Mhz). Le meteore si formano in modo diverso, a seconda della massa del meteoroido, dell'altezza e della velocità di ingresso. A seconda della tipologia si classificano come ipodense se la densità lineare di elettroni è minore di $2,4 \times 10^{\text{exp}14}$ elettroni/metro, come iperdense se è maggiore. Le tracce ipodense sono costituite da elettroni liberi, che risuonano alla stessa frequenza dell'onda incidente e provocano una riflessione parzialmente diffusa. Quelle iperdense sono costituite prevalentemente da ioni, si comportano in modo simile a un conduttore metallico, e provocano una riflessione più nettamente speculare.

Metodi radio per lo studio delle meteore

L'osservazione delle meteore si fa da sempre e molto facilmente a occhio nudo. Con l'avvento della fotografia, prima su pellicola e poi in digitale, sono stati utilizzati obbiettivi a grande campo ed elevata luminosità, e infine sono sopraggiunte le telecamere "all sky" tutt'ora in uso, che utilizzano sistemi automatici di registrazione. Nel loro insieme questi metodi richiedono notti serene e cieli bui senza luna, e consentono perciò un monitoraggio

delle meteore limitato ad una parte delle ore notturne. L'occhio è il recettore più sensibile, potendo raggiungere per le meteore circa la magnitudine stellare limite, e permette di effettuare conteggi della frequenza oraria, ma non consente alcuna misura sulle traiettorie. Le camere raggiungono una magnitudine più modesta, intorno a +3 e, se sincronizzate tra loro, consentono di determinare le traiettorie percorse dai meteoroidi nell'atmosfera. In Italia esiste la rete Prisma, il cui fine è anche di monitorare i meteoroidi di massa più elevata (i cosiddetti bolidi) che raggiungono la superficie terrestre, e di fornire le indicazioni necessarie per un eventuale ritrovamento.

Risulta evidente il vantaggio dell'osservazione radio rispetto all'osservazione ottica: è possibile di giorno e di notte, con qualsiasi stato di copertura del cielo, e consente il rilevamento di meteore molto più deboli. L'osservazione radio non è possibile in alcuni limitati casi, come in presenza di fronti temporaleschi, a causa delle scie ionizzate dei fulmini, e in quei periodi di intensa attività solare che generano stati di ionizzazione anomala dell'alta atmosfera. In conseguenza del grande sviluppo degli apparati radio avvenuto negli anni della guerra, l'osservazione delle meteore con sistemi elettronici ebbe inizio alla fine degli anni '40, utilizzando il radar. Il principio è abbastanza semplice: il radar in trasmissione "illumina" con il suo fascio il campo celeste che si vuole osservare, e riceve gli echi riflessi dalle tracce meteoriche, secondo una semplice geometria a simmetria sferica, che permette di rilevare direttamente la posizione spaziale del punto di riflessione della traccia. Se si combinano più radar, sincronizzati tra loro in trasmissione e in ricezione, si ottiene anche la velocità nelle sue componenti, e si può risalire ai parametri orbitali dei meteoroidi. Questo metodo, che viene tutt'ora utilizzato, ma soltanto in ambito professionale per il costo molto elevato degli impianti, si definisce "back scatter", cioè diffusione del segnale all'indietro.

Esiste un altro metodo di osservazione, chiamato "forward scatter", cioè diffusione del segnale in avanti. In questo caso l'apparato trasmittente, che deve operare nella banda VHF, e quello ricevente sono diversi ed indipendenti, e necessariamente posti ad una distanza superiore a quella che renderebbe possibile la ricezione dell'onda diretta, a causa della curvatura terrestre oppure della presenza di ostacoli orografici importanti. Con queste condizioni, ogni traccia meteorica nello spazio sovrastante determina la formazione di un riflettore momentaneo che permette la ricezione del segnale, ma soltanto in una configurazione geometrica trasmettitore – punto di riflessione - ricevitore ben definita. Secondo la teoria, la riflessione è speculare, cioè gli angoli che l'onda incidente e l'onda riflessa formano con la traccia sono eguali. Ne consegue che la ricezione può teoricamente avvenire soltanto quando la traccia meteorica è tangente a un ellissoide nei cui fuochi si trovano rispettivamente il trasmettitore e il ricevitore. Il punto di tangenza è il punto in cui avviene la riflessione del segnale che viene ricevuto. Tutti i punti di riflessione possibili per una data meteora si trovano nella regione di spazio attraversata dall'ellissoide e compresa tra le quote massima e minima in cui è possibile la formazione della traccia. Per ogni posizione del radiante, e date le posizioni del trasmettitore e del ricevitore, si può determinare la zona di cielo in cui è possibile la riflessione che permette la ricezione degli echi, chiamata "superficie di osservabilità". Senza entrare in ulteriori dettagli, appare chiaro che la geometria che governa il forward scatter è ben più complessa di quella a simmetria sferica del back scatter. La realtà fisica complica ulteriormente le cose: una parte delle tracce si trova in uno stato intermedio tra il modello ipodenso e quello iperdenso, e il meccanismo di riflessione diventa più incerto; talvolta la riflessione non è perfettamente speculare e non avviene in un singolo punto ma in un tratto più o meno lungo della traccia; i venti atmosferici deformano la traccia alterando il segnale riflesso, ecc. Ma, a differenza del back scatter, per questo metodo sono richiesti una sola stazione trasmittente (che può servire un numero indefinito di ricevitori) e un buon apparato ricevente, collocato in un

ambiente con un basso rumore radio di fondo. Apro una breve parentesi storica. L' inizio delle osservazioni amatoriali con il forward scatter risale ai primi anni '80, ad opera di alcuni astrofili della British Meteor Society in una postazione ricevente vicino a Dover, che utilizzavano un ricevitore per le VHF sintonizzato su una stazione televisiva di Danzica (Polonia), che trasmetteva sui 50 Mhz. Nei medesimi anni lo stesso facevamo io ed un amico astrofilo da Rivalba, sulla collina di Torino, utilizzando un ricevitore a valvole ex militare e una grande antenna Yagi di nostra costruzione, sintonizzati su una analoga e potente stazione televisiva della Croazia. Le aspettative erano grandi, ma, oltre al conteggio degli echi per ricavare le frequenze orarie durante gli sciame più importanti, e a qualche profilo di potenza degli echi più lunghi osservato sullo schermo di un oscilloscopio, la tecnologia di quei tempi non permetteva altro. Oggi è possibile andare oltre a quei semplici esperimenti.

Purtroppo le vecchie e potenti stazioni televisive che trasmettevano nella banda 1 VHF non esistono più, e in compenso il rumore radio di fondo è aumentato ovunque a dismisura. Nell' Europa centro-meridionale l'unica sorgente di segnale radio oggi utilizzabile è il radar militare francese Graves, situato vicino a Digione, che trasmette h24 sui 143.050 MHz tramite quattro antenne, che nell'insieme coprono un campo di 180° (Est-Sud-Ovest). Purtroppo ciascuna antenna scansiona ciclicamente il proprio settore di 45° in sei passi successivi, con cambiamenti di fase nel segnale trasmesso. Non è l'onda continua che servirebbe per il forward scatter, e anche la frequenza non è la più adatta, troppo alta rispetto ai 50-60 MHz ottimali, e ancor peggio è situata in una parte dello spettro radio particolarmente affollata. Fa eccezione una piccola parte dell' Europa settentrionale che comprende il Belgio, l'Olanda e alcune parti circostanti del sud dell' Inghilterra, della Francia e della Germania, che sono coperte da un radiofaro situato a Dourbes, nel sud del Belgio, che trasmette sui 49,970 MHz. A questo trasmettitore sono collegate oltre quaranta stazioni riceventi, per la maggior parte gestite da singoli astrofili appartenenti alla organizzazione belga Brams. Si tratta di un felice connubio tra università, struttura pubblica ed astrofili, che opera da oltre vent'anni e rappresenta un bell'esempio di attività amatoriale condotta con metodi e risultati di rilevanza scientifica.

La stazione ricevente dell'osservatorio Urania

I primi ricevitori amatoriali erano apparecchi analogici a valvole, spesso di origine militare, ma caratterizzati da prestazioni superiori alle comuni radio domestiche in termini di sensibilità, selettività e stabilità in frequenza, e idonei a ricevere segnali radio non modulati. Sono successivamente subentrati i ricevitori per le bande dei radioamatori, che si sono costantemente evoluti fino a quelli odierni. La ricezione dei soli radio echi però non necessita delle loro molte e varie caratteristiche, e in particolare non ne giustifica il costo elevato. Oggi è possibile costruire un radoricevitore con prestazioni del tutto equivalenti e più che adeguate al nostro uso, accoppiando un SDR ad un personal computer. Senza entrare in una lunga e non semplice trattazione, in sintesi si può dire che un SDR (Software Defined Radio) è una piccola apparecchiatura che, collegata ad un pc, realizza un sistema radio ricevente privo dei consueti componenti hardware di una radio tradizionale (sintonizzatori, filtri, amplificatori, ecc.). Non esistono componenti e circuiti fisici specifici, e le loro funzioni sono interamente svolte da un software e dall'hardware del pc. Nella configurazione più semplice, l'antenna ricevente viene collegata all'SDR, e l'SDR al pc. Il pc elabora i segnali radio ricevuti in diversi modi: ne rappresenta l'andamento in tempo reale a video attraverso uno spettrogramma, può fare analisi successive e calcoli statistici, ecc.

Le prestazioni di un sistema ricevente di questo tipo dipendono sia dalle prestazioni dell'SDR in termini di campionamento e di frequenza, cioè di "bitrate", e sia dalle prestazioni

del pc in termini di velocità del processore e di ram. E' possibile costruire un ricevitore perfettamente funzionante con un SDR basico da qualche decina di euro e un minicomputer tipo Raspberry, ma nel nostro caso, avendo tra gli obbiettivi anche la possibilità di analizzare la struttura dei radio echi, abbiamo optato per un SDR con caratteristiche avanzate, l' Airspy R2, che ha una frequenza di campionamento di 10 Msps (10 milioni di campioni al secondo), ed un pc con una potenza di calcolo adeguata (processore I5-10500 a 3,6 GHz e Ram 12 GB). Il sistema utilizza tre diversi software, in successione:

1-SDR# per le funzioni di radio ricevitore, che elabora i segnali radio e li restituisce a bassa frequenza attraverso la scheda audio del pc, e rappresenta a video in tempo reale uno spettrogramma dei segnali ricevuti.

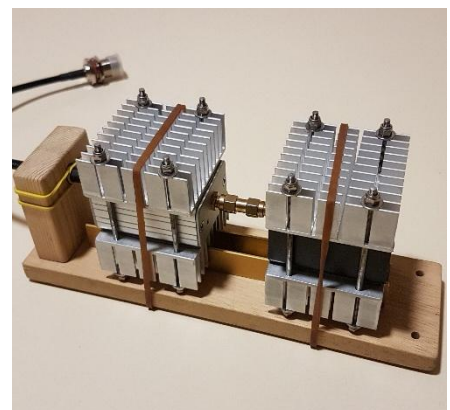
2-Meteor Logger, che analizza i dati ricevuti dalla scheda audio, elimina in buona parte i falsi echi e i disturbi di origine terrestre, misura per ciascun eco i valori di potenza, frequenza e rumore di fondo con la cadenza di 100 misure al secondo, e li memorizza in forma numerica.

3-Process Data, che effettua tutte le successive elaborazioni dei dati generati da Meteor Logger: traccia i grafici di frequenza e potenza di ciascuna meteora, esamina in successione gli echi ricevuti e li suddivide secondo la tipologia ipodensa o iperdensa, esamina gli echi con uno spostamento doppler, esegue i conteggi orari, calcola la frequenza oraria zenitale, esegue altri calcoli statistici, ecc.

Stiamo attualmente lavorando per automatizzare il passaggio dei dati tra i diversi software, in particolare per il riconoscimento degli echi meteorici "veri" e l'eliminazione dei falsi e dei disturbi residui, e per la successiva elaborazione dei soli dati "veri". Questo per ridurre all'indispensabile il lavoro "manuale" dell'operatore, e consentire registrazioni di lunga durata, che producono una grande mole di dati e non sono gestibili manualmente.

La stazione ricevente si trova nell' osservatorio di Bric del Colletto.

A fianco della cupola è installata un' antenna direttiva tipo Yagi a quattro elementi per i 144 MHz, montata con polarizzazione verticale ed orientata verso Graves (azimut 335° ed elevazione 43°). Nel corridoio sottostante del primo piano si trova il ricevitore, composto da un filtro di ingresso a banda stretta con un preamplificatore a basso rumore, l' SDR, e il pc completo di monitor e tastiera, collegato alla rete wi-fi dell'osservatorio. Il ricevitore è comandato completamente da remoto e funziona perciò senza alcun operatore presente.



Attività della stazione ricevente

Il sistema ricevente ora descritto fornisce parecchi risultati interessanti.

-Durante la ricezione lo spettrogramma generato sullo schermo da SDR# è rappresentato in modo continuo, con una schermata in movimento che attraversa in discesa lo schermo (waterfall) in 10 secondi. La schermata mostra una banda di frequenza con un'ampiezza regolabile dello spettro radio centrato sulla frequenza di Graves, con la frequenza secondo l'asse orizzontale e il tempo secondo l'asse verticale. I radio echi sono rappresentati come figure a cavallo della frequenza centrale, di forma lenticolare per le meteore di breve durata, e con forme via via più allungate in verticale per le meteore di maggior durata. La potenza dell'eco è rappresentata con un codice di colori che va dal giallo pallido al rosso. In queste immagini, che scendono lentamente lungo lo schermo, sono visibili se presenti sia gli spostamenti doppler all'inizio dell'eco, e sia le successive trasformazioni della traccia.

-Contemporaneamente Meteor Logger analizza i medesimi echi, e, per ognuno di essi, compila sullo schermo in tempo reale una tabella con la frequenza di 100 righe al secondo, contenente come già detto i valori istantanei di potenza, frequenza e rumore di fondo, e memorizza questi dati in un file. Meteor Logger ha una risoluzione temporale di 10,7 ms, in frequenza di 23,4 Hz, e una frequenza di campionamento di 48 KHz.

-Ad acquisizione finita, il file di Meteor Logger, depurato dai falsi echi e dai disturbi, viene letto da Process Data, che come già detto traccia i grafici potenza/tempo e frequenza/tempo di ciascuna meteora con le risoluzioni sopra indicate, suddivide le meteore in ipodense e iperdense, evidenzia le meteore con uno spostamento doppler, esegue i conteggi orari, calcola la frequenza oraria zenitale, esegue altri calcoli statistici, ecc.

I conteggi degli echi ricevuti rappresentano le variazioni della frequenza oraria durante la giornata. Le rappresentazioni dei profili di potenza mettono in evidenza la natura ipodensa o iperdensa delle meteore, e nel caso di echi di lunga durata possono mostrare le oscillazioni di Fresnel nell'ampiezza, che sono indicative della componente tangenziale della velocità. Sono dovute all'interferenza costruttiva e distruttiva causata dalla differenza di fase tra le onde riflesse da segmenti successivi della traccia. Le rappresentazioni dei profili di frequenza mostrano, se presenti, gli spostamenti doppler dovuti alla componente radiale della velocità. A titolo di curiosità, ricordo che negli anni '80 si ipotizzava che l'affinamento della tecnologia avrebbe permesso in futuro, noti gli spostamenti doppler e le oscillazioni di Fresnel, di determinare con questi soli dati velocità e direzioni delle tracce e di risalire ai rispettivi radianti. Un procedimento che invece rimane tutt'ora impossibile. La qualità dei risultati ottenuti dimostra comunque le ottime prestazioni del sistema ricevente.

Si allegano alcune immagini per meglio illustrare il funzionamento e gli attuali risultati:

-Immagini 1,2,3. Sono screenshots scattati durante la ricezione. A destra lo spettrogramma di SDR# e a sinistra la contemporanea scansione di Meteor Logger. La meteora 1 è ipodensa, le meteore 2 e 3 sono iperdense di lunga durata.

-Immagini 4,5,6. Riguardano una meteora iperdensa. La 4 è lo screenshot durante la ricezione, la 5 è il corrispondente file generato da Meteor Logger, la 6 rappresenta i grafici potenza/tempo e frequenza/tempo di Process Data. Sono chiaramente visibili sia lo spostamento doppler iniziale e sia il profilo di potenza tipico delle meteore iperdense.

-Immagini 7,8,9 Come le precedenti.

The screenshot shows a dual-monitor setup. The left monitor displays the 'Meteor Logger' application, which is a software for logging meteor data. It features a table with columns for Date, Time, Freq, Signal, and Noise. The right monitor displays a software-defined radio (SDR) interface, showing a frequency spectrum plot with a peak at 143.0431 MHz and a waterfall plot below it. The SDR interface also shows various controls like Zoom, Contrast, Range, and Offset.

The image displays two software applications side-by-side. The left application, 'Meteor Logger v1.24a', is a data logging tool for meteor observations. It features a menu bar with 'Audio Device', 'Detection', 'Auto-Notch', and 'Help'. The main interface includes a frequency limit setting (3500 Hz), a 'Start Monitoring' button, and a 'Show Diagram' button. A table of data is shown, with columns for time, frequency, and signal-to-noise ratio. The right application, 'AIIRSPY Studio v1.0.0.1921 32-Bit - AIIRSPY R2 / Mini', is a spectral analysis tool. It features a menu bar with 'File', 'Edit', 'View', 'Tools', 'Settings', 'Help', and 'About'. The main interface includes a frequency spectrum plot, a waterfall plot, and various controls for zoom, contrast, range, and offset.

Meteor Logger v1.24a

Audio Device Detection Auto-Notch Help

Meteor Logger

0 <= Set lower/upper frequency limit in Hz => 3500

Start Monitoring Show Diagram

Stop Monitoring Notch-Frequ. [Hz]: Monitoring is running ...

Time	Freq	Signal	Noise
00017 2026-06-16 06:56:08.620	90.0	1.17E-03	4.17E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.630	86.8	2.43E-03	4.68E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.640	88.1	1.54E-03	3.87E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.650	-1.0	0.00E+00	4.50E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.660	91.4	1.15E-03	5.30E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.670	93.7	1.07E-03	4.29E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.679	95.4	1.50E-03	5.12E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.689	-1.0	0.00E+00	4.88E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.702	93.3	1.54E-03	4.69E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.715	93.6	1.32E-03	4.73E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.727	91.4	1.60E-03	4.34E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.740	89.8	2.89E-03	5.65E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.750	89.0	4.89E-03	6.40E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.760	90.2	5.24E-03	6.65E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.769	89.6	3.44E-03	6.20E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.779	91.4	2.56E-03	4.64E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.789	90.5	2.42E-03	3.44E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.799	93.8	9.95E-04	4.98E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.809	89.7	2.84E-03	5.18E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.819	89.2	1.72E-03	4.07E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.829	93.4	1.37E-03	5.11E-05
00017 2026-06-16 06:56:08.839	-1.0	0.00E+00	5.35E-05

NR-----Date-----Time-----F/MHz-----Signal-----Noise

Time	Freq	Signal	Noise
00018 2026-06-16 06:56:08.885	89.6	1.30E-03	5.99E-05
00018 2026-06-16 06:56:08.897	89.8	1.00E-03	5.31E-05
00018 2026-06-16 06:56:08.910	-1.0	0.00E+00	4.01E-05
00018 2026-06-16 06:56:08.920	91.7	9.39E-04	5.32E-05
00018 2026-06-16 06:56:08.930	92.7	7.78E-04	5.28E-05
00018 2026-06-16 06:56:08.939	101.9	8.98E-04	4.85E-05

Hour: 06 => 18 counts

Quit

AIIRSPY Studio v1.0.0.1921 32-Bit - AIIRSPY R2 / Mini

File Edit View Tools Settings Help About

000.143.049.900

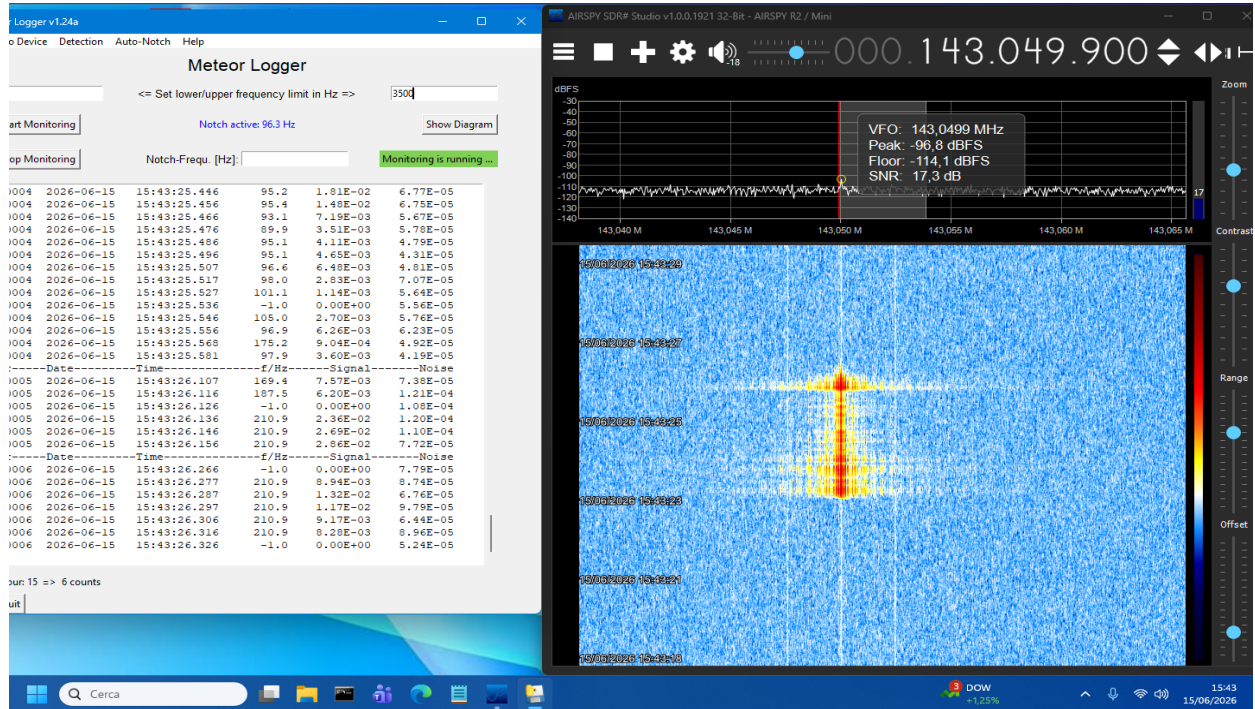
dBFS

143.035 M 143.040 M 143.045 M 143.050 M 143.055 M 143.060 M 143.065 M 143.070 M

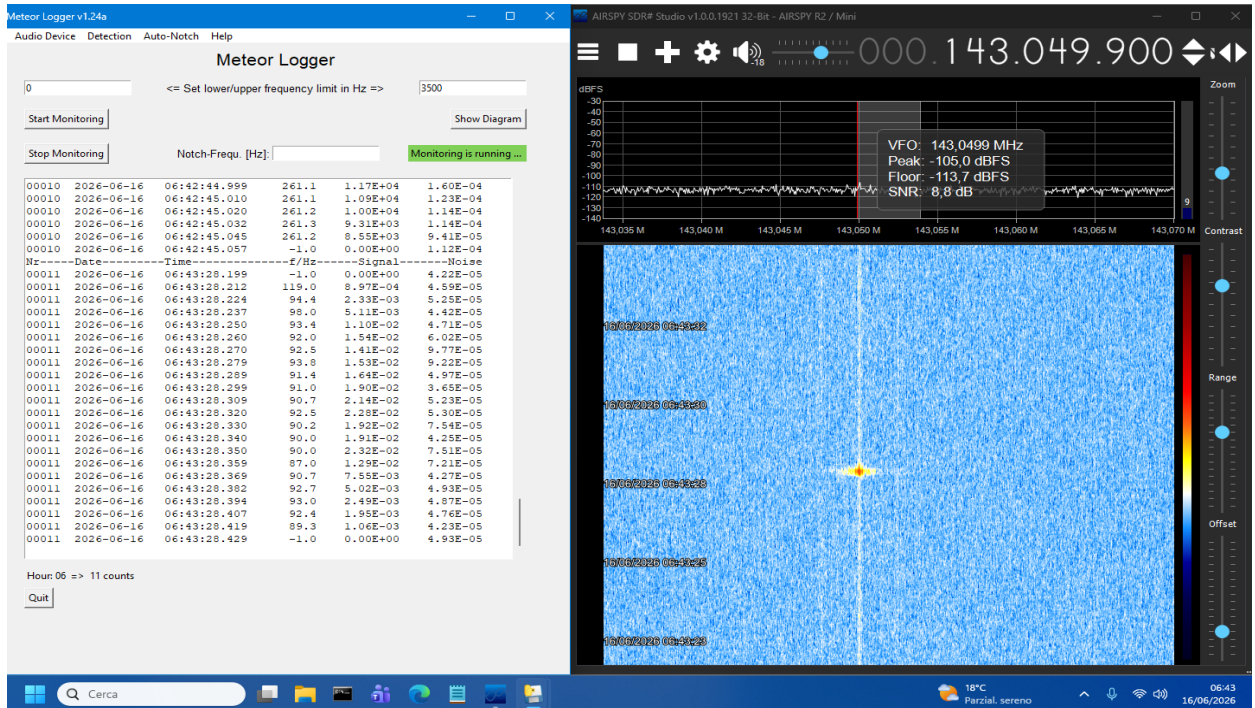
Zoom Contrast Range Offset

18°C Parzial sereno 06:56 16/06/2026

3



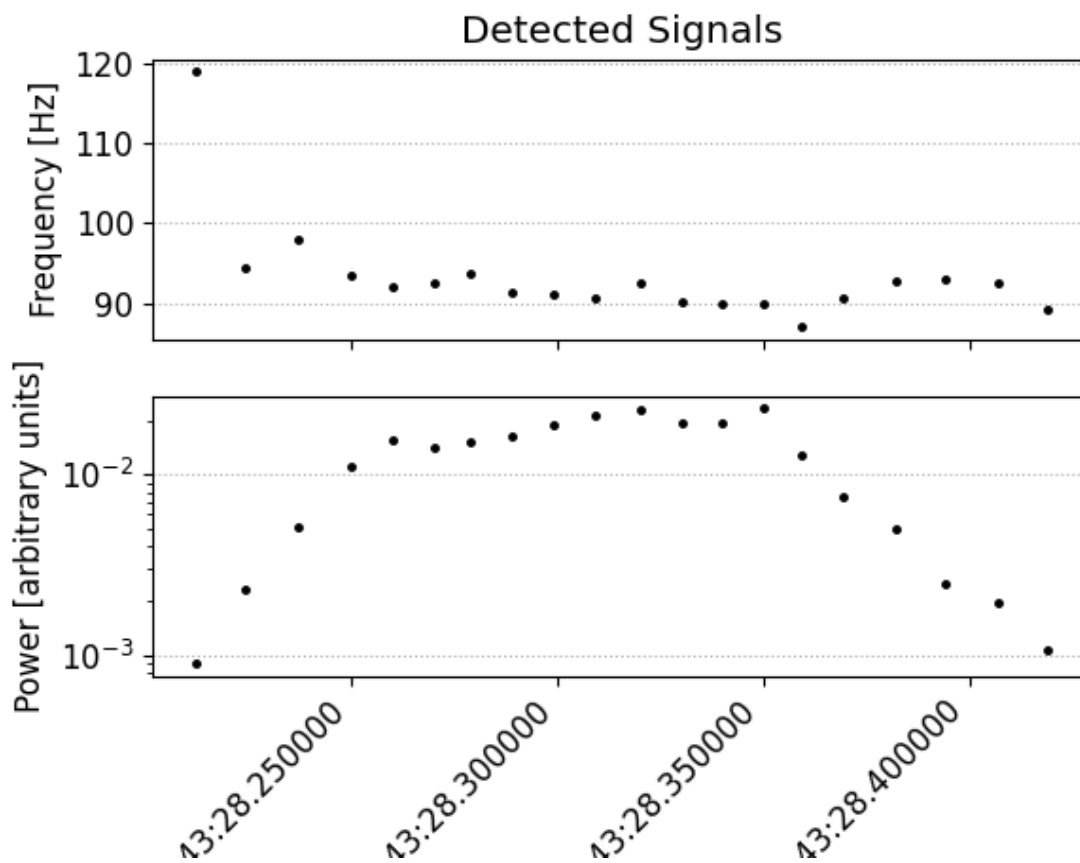
4



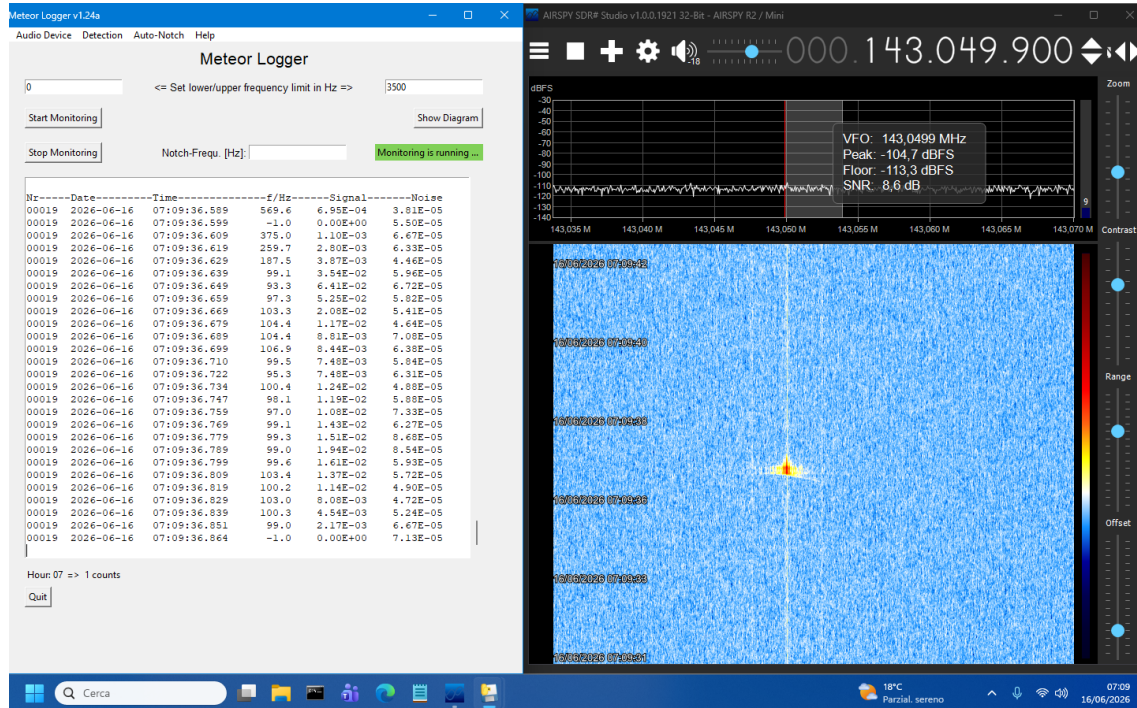
5

Nr	Date	Time	f/Hz	Signal	Noise
00011	2026-06-16	06:43:28.199	-1.0	0.00E+00	4.22E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.212	119.0	8.97E-04	4.59E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.224	94.4	2.33E-03	5.25E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.237	98.0	5.11E-03	4.42E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.250	93.4	1.10E-02	4.71E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.260	92.0	1.54E-02	6.02E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.270	92.5	1.41E-02	9.77E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.279	93.8	1.53E-02	9.22E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.289	91.4	1.64E-02	4.97E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.299	91.0	1.90E-02	3.65E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.309	90.7	2.14E-02	5.23E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.320	92.5	2.28E-02	5.30E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.330	90.2	1.92E-02	7.54E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.340	90.0	1.91E-02	4.25E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.350	90.0	2.32E-02	7.51E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.359	87.0	1.29E-02	7.21E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.369	90.7	7.55E-03	4.27E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.382	92.7	5.02E-03	4.93E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.394	93.0	2.49E-03	4.87E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.407	92.4	1.95E-03	4.76E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.419	89.3	1.06E-03	4.23E-05
00011	2026-06-16	06:43:28.429	-1.0	0.00E+00	4.93E-05

6

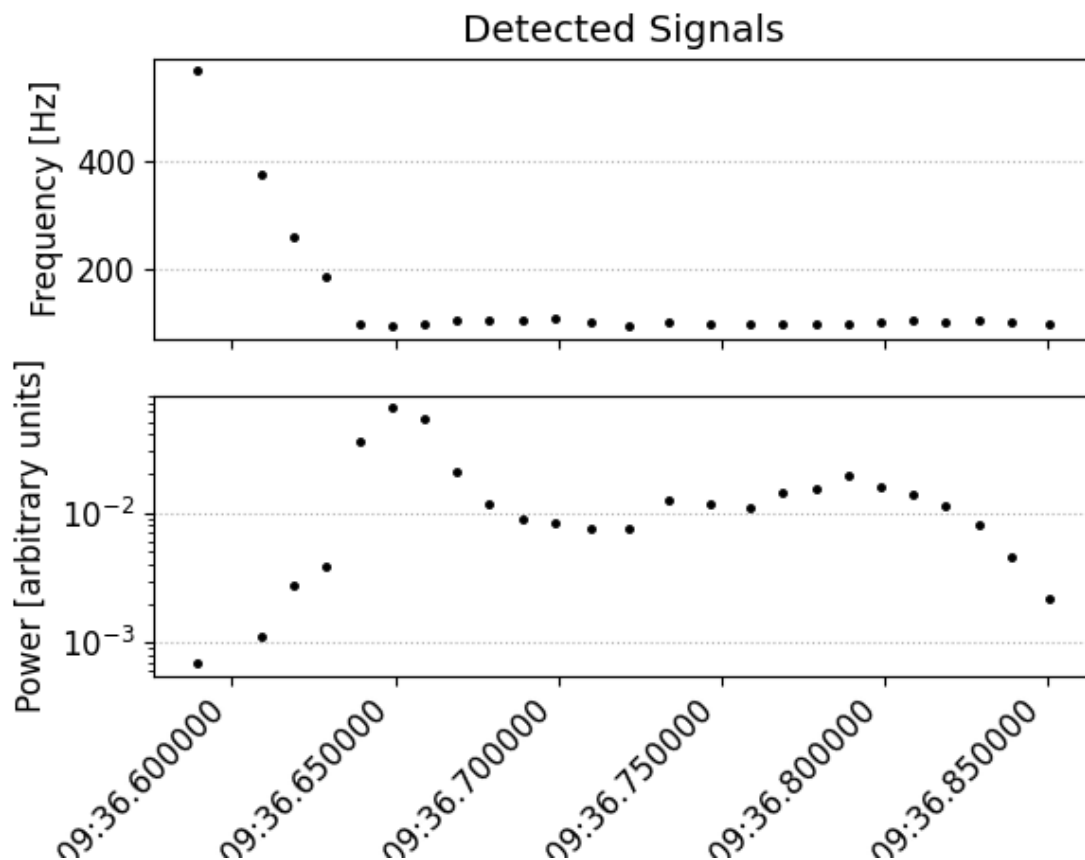


7



8

Nr	Date	Time	f/Hz	Signal	Noise
00019	2026-06-16	07:09:36.589	569.6	6.95E-04	3.81E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.599	-1.0	0.00E+00	5.50E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.609	375.0	1.10E-03	6.67E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.619	259.7	2.80E-03	6.33E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.629	187.5	3.87E-03	4.46E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.639	99.1	3.54E-02	5.96E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.649	93.3	6.41E-02	6.72E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.659	97.3	5.25E-02	5.82E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.669	103.3	2.08E-02	5.41E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.679	104.4	1.17E-02	4.64E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.689	104.4	8.81E-03	7.08E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.699	106.9	8.44E-03	6.38E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.710	99.5	7.48E-03	5.84E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.722	95.3	7.48E-03	6.31E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.734	100.4	1.24E-02	4.88E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.747	98.1	1.19E-02	5.88E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.759	97.0	1.08E-02	7.33E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.769	99.1	1.43E-02	6.27E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.779	99.3	1.51E-02	8.68E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.789	99.0	1.94E-02	8.54E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.799	99.6	1.61E-02	5.93E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.809	103.4	1.37E-02	5.72E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.819	100.2	1.14E-02	4.90E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.829	103.0	8.08E-03	4.72E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.839	100.3	4.54E-03	5.24E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.851	99.0	2.17E-03	6.67E-05
00019	2026-06-16	07:09:36.864	-1.0	0.00E+00	7.13E-05



Da un punto di vista più strettamente scientifico, l'osservazione di uno sciame meteorico con una singola stazione ricevente permette di determinare soltanto due parametri fondamentali: la densità di flusso $Q(m_0)$, definita come numero di meteoroidi con massa maggiore di m_0 che attraversa nell'unità di tempo una superficie unitaria perpendicolare al flusso, e l'indice di massa S , che descrive la distribuzione in massa delle particelle dello sciame. Si tratta di parametri utili per lo studio degli sciami meteorici e della loro evoluzione. Il calcolo della densità di flusso richiede la suddivisione delle tracce rilevate in ipodense ed iperdense, come già detto attraverso i profili di potenza degli echi, e la determinazione della "funzione di osservabilità", che è una grandezza tipica del ricevitore e ne definisce la sensibilità in funzione della direzione del radiante. La distribuzione di massa dello sciame è correlata alla durata, al tempo di decadimento e alla potenza dei segnali ricevuti, ricavabili nuovamente dai profili di potenza degli echi. Con una stazione singola non è invece possibile determinare la posizione del punto di riflessione e la velocità dei meteoroidi.

Altre possibilità

La costruzione e l'installazione di altre stazioni riceventi entro un raggio di 10 – 40 Km dall'osservatorio Urania consentirebbe di estendere ulteriormente il campo di studio. La costruzione di una stazione ricevente come quella ora in funzione comporta un costo economico ridotto, intorno ai 350 euro oltre al pc, le cui prestazioni, come già detto, sono pari a quelle di qualsiasi pc recente. L'unica condizione necessaria per la costruzione di una rete è che le stazioni siano tutte rigorosamente eguali. La sincronizzazione temporale delle stazioni viene fatta attraverso il segnale GPS.

Con una rete di stazioni è possibile estendere lo studio alle direzioni e alle velocità delle meteore, cioè all'individuazione dei radiant. Mi limito ad esporre queste possibilità dal punto di vista concettuale, senza entrare in questioni tecniche e soprattutto matematiche complesse. I dati necessari per determinare la provenienza dei meteoroidi di cui si osservano le tracce (sporadici, appartenenti a uno sciame, esterni al sistema solare) sono la posizione spaziale del punto di riflessione del segnale radio, e la velocità del meteoroid nelle sue componenti. Dal punto di vista matematico ci sono tre incognite spaziali per il punto di riflessione (le tre coordinate del suo vettore posizione), e altrettante per la velocità del meteoroid (le tre coordinate del vettore velocità).

Ogni stazione che si aggiunge oltre alla prima elimina un' incognita del problema. In una rete formata da sei stazioni riceventi esattamente sincronizzate tra loro, ciascuna di esse, a causa delle differenti geometrie della ricezione, rileva il medesimo eco in istanti diversi. Combinando i dati delle sei stazioni si arriva a scrivere un sistema di sei equazioni differenziali in sei incognite, le cui soluzioni forniscono la posizione del punto di riflessione, la direzione della traccia e la velocità della meteora. Questo metodo, concettualmente semplice, comporta però notevoli difficoltà di calcolo perché il sistema di equazioni è complesso, non lineare, e non è risolvibile per via analitica. La precisione dei risultati ottenuti dipende poi in misura sostanziale dalla precisione della sincronizzazione temporale delle stazioni riceventi.

Si può invece realizzare una stazione ricevente con più antenne configurate come un interferometro. Ogni antenna fa capo ad un ricevitore esattamente sincronizzato con gli altri. Attraverso le differenze di fase del medesimo eco nei diversi ricevitori, è possibile determinare la direzione del punto di riflessione della meteora, ma non la sua posizione e la velocità. Nel caso invece in cui sia noto il radiante di appartenenza, è nota anche la direzione nello spazio della traccia, e si può determinare anche la velocità.

Infine, si possono aggiungere alla stazione ricevente principale configurata come interferometro sopra descritta altre tre stazioni secondarie singole, sempre tutte esattamente sincronizzate. Questa configurazione risolve completamente il problema con sole quattro stazioni indipendenti: l'interferometro fornisce direttamente la direzione del punto di riflessione, e combinando i dati delle altre stazioni possono essere calcolate la sua distanza, la direzione della traccia e la velocità, cioè tutto. La trattazione matematica risulta in questo caso relativamente più semplice e la precisione dei risultati è nettamente migliore.

Quest' ultima configurazione è stata realizzata dall'organizzazione belga Brams, a cui accennavo in precedenza. La stazione principale si trova a Humain, nel Belgio meridionale, ed è costituita da cinque antenne: un' antenna centrale ed altre quattro poste alle estremità di due assi ortogonali passanti per la prima (interferometro tipo Jones). Le tre stazioni secondarie hanno la medesima configurazione hardware e lo stesso livello di prestazioni della nostra stazione. Nel 2023 Brams ha pubblicato i risultati ottenuti con la rete interferometrica sopra descritta, confrontandoli con i risultati ottenuti sulle medesime meteore dalla rete belga di camere ottiche all-sky (equivalente alla nostra rete Prisma). Le differenze sono piccole, di alcuni punti percentuali, a dimostrazione del fatto che il metodo radio interferometrico di forward scatter può produrre risultati di pari livello rispetto ai metodi ottici tradizionali, con il grande vantaggio di operare h24 in qualsiasi condizione meteorologica, e di rilevare meteore molto più deboli

Maurizio Bordiglia
(Associazione Astrofili Urania)