

Radio Meteore

Flavio Falcinelli, RadioAstroLab s.r.l. - Strada della Marina 9/6 Senigallia (AN), Italy - <http://www.radioastrolab.it>

Un'attività molto interessante è l'osservazione radio di fenomeni astronomici che influenzano la ionosfera terrestre. In questo documento descriveremo una tecnica di osservazione amatoriale che utilizza una configurazione di radar bi-statico per registrare le riflessioni radio prodotte dalle tracce ionizzate che si formano, a circa 100 km di quota, quando oggetti molto veloci provenienti dallo spazio esterno si consumano entrano nell'atmosfera terrestre.

Osservazione radio degli eventi meteorici

Durante il suo moto di rivoluzione intorno al Sole la Terra incrocia l'orbita di un grandissimo numero di corpi, detti *meteoroidi*, con massa compresa tra circa 10^{-15} g e 10^{15} Kg e velocità di entrata nell'atmosfera variabili tra circa 11 Km/s e oltre 70 Km/s.

I corpi progenitori dei meteoroidi sono le comete, con nuclei costituiti da ghiacci e polveri che liberano gas e detriti durante il loro avvicinamento al Sole formando la chioma e la caratteristica coda e gli asteroidi, corpi rocciosi e/o metallici principalmente confinati nella Fascia Asteroidale Principale, tra l'orbita di Marte e quella di Giove. Al contrario delle comete, gli asteroidi non contengono elementi volatili e sono le reciproche collisioni ad espellere i frammenti nello spazio con velocità relativamente basse: i detriti tendono a mantenersi su orbite simili a quelle del corpo progenitore, formando uno *sciame meteorico*.

Per motivi prospettici, ad un osservatore sembrerà che le meteore di uno stesso sciame si irradiano da una regione ristretta del cielo, detta *radiante meteorico*

che prende il nome dalla costellazione o dalla stella più vicina al radiante. Sono noti circa 150 sciame meteorici distribuiti durante l'arco dell'anno: i più importanti sono elencati nella figura 1.

Sciame	Periodo di attività	Data max	Coordinate radiante		Velocità (km/s)	ZHR max	Corpo progenitore
			AR	DEC			
Quadrantidi	01/01 – 05/01	03/01	15h 20m	+49°	41	120	(196256) 2003 EH ₁
Liridi	15/04 – 28/04	22/04	18h 04m	+34°	49	15	C/1861 G1 Thatcher
Eta Aquaridi	19/04 – 28/05	06/05	22h 32m	-01°	66	60	1P/Halley
Arietidi	22/05 – 02/07	07/06	02h 56m	+24°	38	54	1566 Icarus
Beta Tauridi	05/06 – 18/07	29/06	05h 18m	+21°	n/a	25	2P/Encke
Sud Delta Aquaridi	12/07 – 19/08	28/07	22h 36m	-16°	41	20	?
Perseidi	17/07 – 24/08	12/08	03h 04m	+58°	59	90	109P/Swift-Tuttle
Draconidi	06/10 – 10/10	08/10	17h 28m	+54°	20	Var.	21P/Giacobini-Zinner
Orionidi	02/10 – 07/11	21/10	06h 20m	+16°	66	20	1P/Halley
Leonidi	14/11 – 21/11	17/11	10h 12m	+22°	71	Var.	55P/Tempel-Tuttle
Alpha Monocerotidi	15/11 – 25/11	21/11	07h 20m	+03°	60	Var.	?
Geminidi	07/12 – 17/12	14/12	07h 28m	+33°	35	120	3200 Phaethon
Ursidi	17/12 – 26/12	22/12	14h 28m	+76°	33	10	8P/Tuttle

Figura 1: Elenco dei principali sciame meteorici [2].

Il nostro pianeta è quindi sottoposto a un continuo "bombardamento": gli effetti sarebbero disastrosi se l'atmosfera non esercitasse un'azione di schermo dissipando la loro energia cinetica in radiazione elettromagnetica (calore, luce e ionizzazione).

Il termine *meteora* dovrebbe indicare solo l'insieme dei fenomeni cui un meteoroidi da luogo, ma è abitudine estenderne il significato anche al corpo stesso. Si chiamano *meteoriti* gli oggetti di maggiori dimensioni (con una massa superiore a 10 Kg) che, sebbene consumati dall'attrito con l'atmosfera, riescono a raggiungere la superficie dove producono crateri anche di notevoli proporzioni. All'estremo opposto si collocano i *micrometeoriti*, particelle molto piccole (massa inferiore a 10^{-7} g) che dissipano tutta

la loro energia cinetica per irraggiamento e cadono lentamente, raggiungendo la superficie per gravità.

I fenomeni più interessanti per il nostro studio sono legati alle meteore, corpi con massa compresa fra 10^{-7} g e 10^4 g che producono significativi effetti di ionizzazione nella parte alta dell'atmosfera (quote comprese fra circa 80 km e 120 km). Questi oggetti sono tanto più numerosi quanto minori sono le loro dimensioni e, con buona approssimazione, si può stimare che il flusso di meteore con massa maggiore a un dato valore sia inversamente proporzionale a quel valore. Ogni giorno entrano nell'atmosfera terrestre mediamente circa dieci milioni di meteore con massa maggiore o uguale a un centesimo di grammo e ben quattro miliardi di corpi con massa maggiore o uguale a un decimillesimo di grammo. Come si vedrà sperimentalmente (figura 16), il flusso meteorico che colpisce la Terra è caratterizzato da ampia variazione diurna, con un massimo verso le prime ore del mattino e un minimo verso le 18: il rapporto tra i due estremi è dell'ordine di 5.

Il fenomeno di ionizzazione generato dalle meteore influisce sulle condizioni fisiche delle regioni inferiori della ionosfera ed è molto importante per la propagazione delle onde radio a grandi distanze: studiare la radiazione elettromagnetica e gli effetti causati dalla colonna di elettroni formata dal passaggio di un meteoroido rappresenta lo scopo dei nostri progetti.

Entrando nell'atmosfera terrestre con velocità di 70-100 Km/s, un corpo impatta con le molecole di aria liberando, a ogni urto, energia termica dell'ordine di 100 eV: la successione degli urti riscalda notevolmente l'oggetto che fonde ed evapora in superficie, perdendo progressivamente massa (processo di ablazione). Gli atomi del meteoroido, liberati per ablazione, collidono con le molecole e con gli atomi dell'aria rilasciando una certa quantità di energia che provoca radiazione elettromagnetica, eccitazione luminosa e ionizzazione degli atomi espulsi, oltre ad un aumento locale della temperatura dell'aria. La traccia ionizzata, mentre si forma, genera una struttura cilindrica con un raggio di circa 10 cm e una densità volumetrica di elettroni liberi molto superiore a quella dell'aria circostante: dopo un certo tempo inizia un processo di diffusione (e di ricombinazione) delle cariche libere che causa un rapido decadimento della densità di carica volumetrica (numero di elettroni liberi contenuti in un metro cubo di traccia), fino alla sua completa dissoluzione.

Le lunghe e sottili colonne di plasma di breve durata generate dalla ionizzazione di un evento meteorico sono in grado di riflettere le onde radio emesse da un radar operante nella banda VHF (30-300 MHz).

Questo termine (*Radio Detection And Ranging*) identifica un sistema elettronico che osserva oggetti distanti utilizzando la riflessione o la dispersione (*scattering*) di onde radio emesse da un trasmettitore che "illumina" il bersaglio. Il radar VHF è, quindi, un potente mezzo di indagine per lo studio dei corpi del sistema solare.

I radar dedicati allo studio delle meteore e della materia interplanetaria che interagisce con l'atmosfera terrestre si chiamano *radar meteorici* e i più diffusi sono di tipo bi-statico: il trasmettitore e il ricevitore sono posizionati distanti uno dall'altro, in modo che la curvatura terrestre impedisca al ricevitore di captare direttamente i segnali del trasmettitore (figura 2). Solo quando la traccia meteorica riflette o diffonde obliquamente (*forward scattering*) le onde radio che la investono, l'eco raggiunge il ricevitore e produce una traccia radar. Per un radar bi-statico, il volume di atmosfera dal quale provengono le riflessioni radio è dato dall'intersezione del lobo di ricezione del trasmettitore con quello del ricevitore.

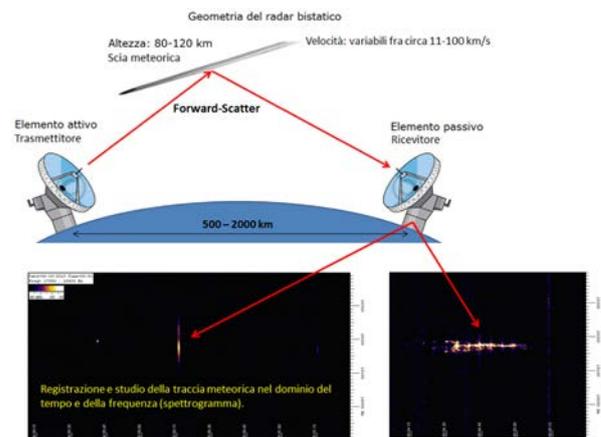


Figura 2: Geometria del radar meteorico bi-statico (elaborato da [2]).

Questa tecnica, chiamata *Radio Meteor Scatter*, presenta molti vantaggi rispetto agli altri metodi di osservazione: è operativa con continuità a qualsiasi ora del giorno, non è sensibile alle condizioni meteorologiche, copre grandi aree di cielo ed è in grado di rivelare meteore molto piccole (massa dell'ordine dei microgrammi). Il sistema è adatto non solo per il monitoraggio delle tracce meteoriche e dei detriti spaziali, ma anche di molti altri fenomeni atmosferici in grado di disperdere energia elettromagnetica nella banda VHF (come, ad esempio, i fulmini), ed è facilmente implementabile con un'antenna, un buon ricevitore radio e un computer.

Possiamo allora studiare questo fenomeno a livello amatoriale installando la parte passiva (quella ricevente) di un radar bi-statico in modo da sfruttare un

potente trasmettitore radio commerciale o militare come parte attiva.

Uno di questi, particolarmente adatto allo scopo, è il radar francese *GRAVES* (Grand Réseau Adapté à la Veille Spatiale), un sistema di sorveglianza dello spazio che rileva satelliti artificiali e detriti orbitanti attorno alla Terra ad altezze comprese tra 400 km e 1000 km, calcola la loro orbita e li cataloga. *GRAVES* è un radar bi-statico: il sistema trasmettente è situato circa 35 km a est di Dijon e la parte ricevente a circa 360 Km verso sud. Il trasmettitore (figura 3), che opera alla frequenza di 143.050 MHz, è composto da 4 array di antenne a pannello (phased array) meccanicamente fisse in azimut (distribuite in modo da coprire l'angolo sud 90-270 gradi con una spaziatura angolare di 45 gradi tra un pannello e l'altro) e in elevazione (con angolo di circa 30 gradi e apertura del fascio di 20-25 gradi). La portante del segnale radio è trasmessa contemporaneamente in 4 direzioni diverse del cielo, equispaziate tra loro, con una potenza radio di circa 10 kW per ogni pannello.



Figura 3: Due delle quattro antenne a pannello del trasmettitore radar *GRAVES* operante a 143.050 MHz (Observatoire de Paris, Division Surveillance Espace).



Figura 4: Distanza TX-RX del radar bi-statico.

Per osservare e registrare i segnali radio riflessi dalle tracce ionizzate meteoriche si sintonizza il ricevitore sulla frequenza del trasmettitore radar *GRAVES* che "illumina" costantemente una vasta porzione di cielo. Solo quando la traccia meteorica riflette o

diffonde obliquamente le onde radio incidenti generate dal trasmettitore queste possono raggiungere il ricevitore e produrre un eco radar. Il fenomeno (con una durata tipica da frazioni di secondo a qualche secondo) si studia analizzando l'evoluzione nel tempo dello spettro associato alla riflessione radio della traccia meteorica ionizzata (spettrogramma), utilizzando adatti programmi reperibili gratuitamente sul web. Misurando l'intensità del segnale ricevuto e il suo spostamento doppler in frequenza, si ricavano importanti informazioni sul movimento della sorgente.

Questo sistema è concettualmente semplice ed economico, alla portata di tutti: è sufficiente avere un buon ricevitore VHF operante sulla stessa frequenza del trasmettitore, un'antenna e un PC equipaggiato con il software adatto.

Si possono scegliere vari trasmettitori come "illuminatori" del cielo: stazioni emittenti FM commerciali operanti nell'intervallo 88-108 MHz (non è cosa sempre agevole, visto l'affollamento in banda), emittenti TV analogiche (purtroppo ne sono rimaste poche, tutte nell'Europa dell'est), oppure trasmettitori dedicati come quello francese del radar *GRAVES*, operante a 143.050 MHz, utilizzato per controllare i detriti spaziali in orbita attorno alla Terra e scelto per i nostri progetti di osservazione delle radiometeore.

E' molto importante che il trasmettitore garantisca un servizio continuo e si trovi a una distanza, dalla stazione ricevente, compresa fra 500 e 2000 km. Inoltre, è desiderabile che la potenza di segnale trasmessa sia stabile, ad onda continua non modulata (CW) e che il fascio dell'antenna trasmettente "illumini" sempre la stessa zona di cielo, senza variazioni spaziali.

Il trasmettitore del radar *GRAVES* non soddisfa perfettamente tutti i requisiti, dato che il fascio dell'antenna trasmettente non "illumina" sempre una stessa zona del cielo, ma effettua una scansione periodica producendo zone d'ombra dove potrebbero non essere rilevate eventuali tracce meteoriche (figura 5). Nonostante ciò, il trasmettitore francese sembra uno dei più affidabili in termini di continuità di esercizio e di purezza della radiazione emessa ed è posizionato alla giusta distanza dalle nostre stazioni riceventi.

Nei seguenti paragrafi descriveremo due progetti che implementano un radar bi-statico utilizzando il trasmettitore *GRAVES* per osservare gli oggetti che transitano in cielo a una quota dell'ordine di 100 km. La distanza del trasmettitore dalle nostre stazioni riceventi è circa 725 km in linea d'aria (figura 4), quindi la portante del trasmettitore a 143.050 MHz non è ricevibile, normalmente, per onda diretta.

Lo studio delle riflessioni radio avverrà nel dominio della frequenza, tramite spettrogrammi. Questi radio-echi (che durano da frazioni di secondo a qualche secondo) si manifestano come improvvisi incrementi nel livello del segnale ricevuto e si analizzano misurando la loro intensità e il loro spostamento doppler in frequenza, ricavando importanti informazioni sul movimento della sorgente che provoca lo scattering.

Gli esperimenti avranno le seguenti finalità:

- Verificare la fattibilità e la funzionalità di due differenti stazioni che realizzano gli elementi passivi del radar bi-statico in VHF basato sull'elemento attivo GRAVES.
- Utilizzare una tecnologia comunemente accessibile ai radioamatori per la costruzione delle stazioni.
- Apprendere e approfondire i principi tecnici e fisici che regolano il funzionamento del sistema (tecnica *meteor scatter*, effetti della propagazione radio in VHF, caratterizzazione e analisi degli eventi nel dominio della frequenza).
- Sfruttare l'attività degli sciami meteorici più importanti per verificare il funzionamento degli strumenti e pianificare dimostrazioni pubbliche affiancate a quelle ottiche.
- Confrontare le nostre osservazioni con quelle di altri appassionati per verificare e studiare eventuali correlazioni.
- Utilizzare la stazione fissa come elemento remoto connesso a una rete amatoriale di osservatori funzionante in continuità 24 ore al giorno.

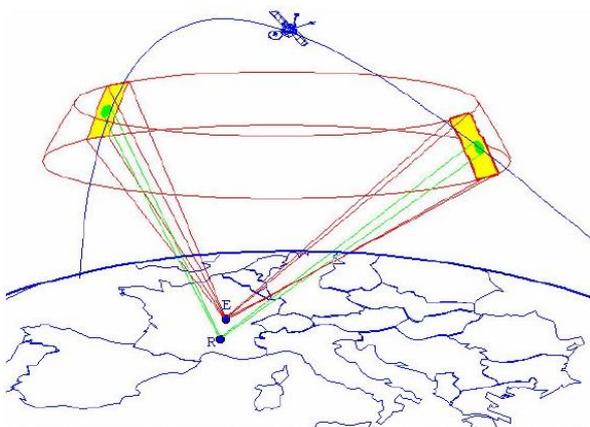


Figura 5: Regione di cielo "illuminata" dal radar GRAVES.

La prima parte dell'analisi servirà a raccogliere e a catalogare una quantità elevata e differenziata di "firme spettrali" delle riflessioni con lo scopo di evidenziare la geometria e l'evoluzione di ogni fenomeno, ben rappresentati nello spettrogramma dell'evento.

Non sarà difficile, con il tempo, preparare un catalogo di immagini spettrali dettagliate che descrivono la tipologia e l'evoluzione temporale degli echi meteorici. Parallelamente, si possono implementare algoritmi finalizzati al conteggio degli eventi a lungo termine e si valuteranno le statistiche sulla loro occorrenza annuale. Questo aspetto può essere semplificato utilizzando adatti software, sviluppati da appassionati, disponibili gratuitamente nel web.

Sono stati costruiti due prototipi di stazioni riceventi che soddisfano differenti esigenze: una stazione fissa, funzionante continuamente 24 ore al giorno destinata al monitoraggio, alla registrazione continua degli eventi e controllabile da remoto, una stazione mobile utilizzata "sul campo" nelle dimostrazioni pubbliche, in parallelo alle tradizionali osservazioni visuali delle "stelle cadenti" durante il verificarsi dei principali sciami meteorici.

La stazione fissa *RALmet*

La stazione fissa sperimentale *RALmet*, operante alla frequenza di 143.050 MHz, è ottimizzata per la ricezione degli echi meteorici prodotti dal radar francese GRAVES. Il ricevitore e l'antenna sono stati appositamente costruiti.

Il sistema opera con continuità, 24 ore su 24, registrando gli spettrogrammi ricevuti ad intervalli di tempo regolari, scaricati ogni giorno dal PC di stazione e successivamente analizzati. Si eseguono conteggi di eventi, analisi statistiche e analisi spettrali.

Il ricevitore può essere un buon ricevitore VHF da radioamatori accoppiato ad un'antenna commerciale [2] (sul web si trovano ottimi esempi di stazioni amatoriali), oppure progettato e costruito appositamente per questa applicazione, come nel nostro caso. Forniremo qualche informazione sulle caratteristiche tecniche del nostro ricevitore e dell'antenna utilizzata, indicative per comprendere quali sono i requisiti della stazione ricevente importanti per condurre una seria attività di ricerca in questo settore. Ovviamente questa è una fra le tante proposte possibili, né la migliore, ma rappresenta una configurazione che, dopo alcune ottimizzazioni, ha ottimamente soddisfatto le aspettative.

In effetti, molta cura è stata dedicata alla costruzione di un ricevitore dedicato che doveva essere molto

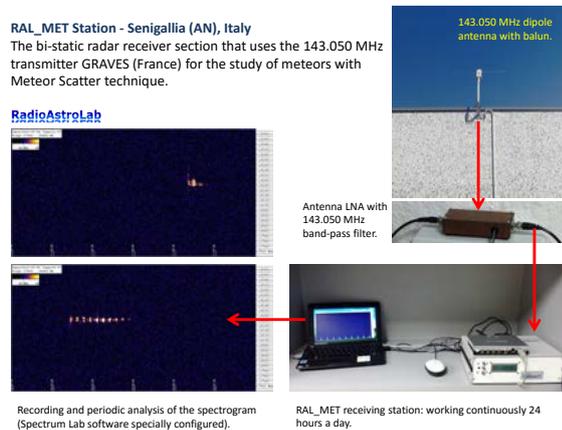


Figura 7: *Stazione fissa RALmet.*

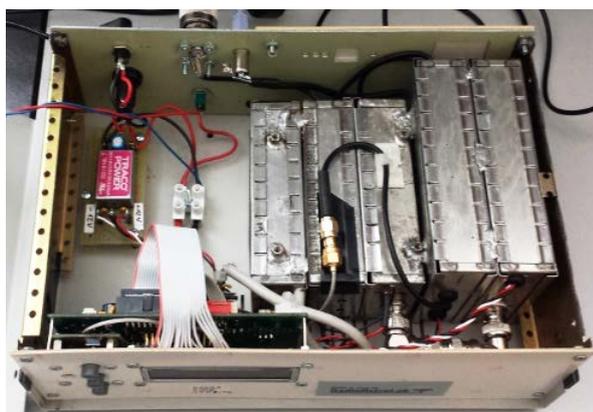


Figura 8: *Prototipo del ricevitore costruito per la stazione fissa RALmet.*

Per scelta si è evitato qualsiasi sistema automatico per il conteggio degli eventi meteorici: dopo molte prove, il programma *Spectrum Lab* è stato configurato per l'acquisizione di entrambi i canali in banda-base I e Q del ricevitore (quello in fase e quello in quadratura) con reiezione della frequenza immagine, esaltando la risoluzione in frequenza dello spettrogramma e impostando una registrazione automatica e periodica dei dati al ritmo di uno spettrogramma ogni 3 minuti.

L'utilizzo del software *TeamViewer* (anche questo reperibile gratuitamente su internet per uso personale) consente il controllo remoto del PC di acquisizione comodamente da casa, con la possibilità di scaricare ogni giorno gli spettrogrammi registrati.

La successiva analisi è visuale: si esaminano pazientemente le singole registrazioni per individuare le "firme" spettrali degli eventi meteorici per catalogarli e conteggiarli. Questo modo di procedere, indubbiamente più impegnativo rispetto ai sistemi automatici tramite software dedicati, è molto preciso e affidabile, dato che minimizza la possibilità del conteggio di falsi eventi, anche se richiede un periodo

di "rodaggio" iniziale per guadagnare esperienza.

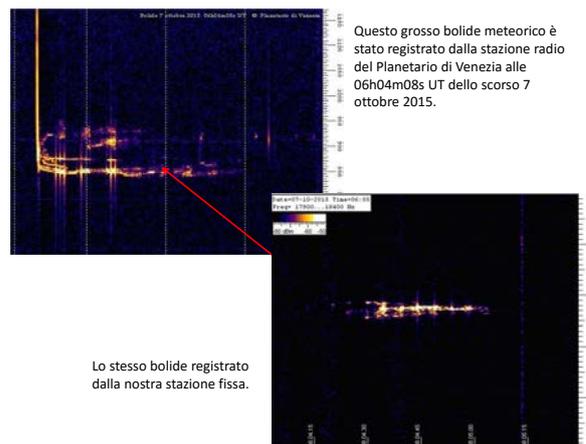


Figura 9: *Bolide meteorico registrato alle 06h04m08s UT dello scorso 7 ottobre 2015.*

Esempi interessanti di spettrogrammi registrati dalla stazione fissa *RALmet* sono riportati nelle figure 9, 10, 11, 12 e 13, dove si vedono strutture complesse che, spesso sono difficili da interpretare. In molti casi si tratta di parti ionizzate che si manifestano con differente frequenza (quindi con differenti velocità di gruppo) che iniziano in un dato istante, scompaiono e riappaiono successivamente alla stessa frequenza. L'evoluzione di queste tracce è, probabilmente, la combinazione di una serie di processi che interagiscono: parti distinte della meteora possono, ad esempio, essere il risultato di fasi successive di ionizzazione, trasportate dai forti venti in quota con diversi percorsi.

Come si vede, le tracce delle riflessioni sono visualizzate con spettrogrammi, immagini che rappresentano l'evoluzione del fenomeno nel dominio della frequenza: l'asse orizzontale rappresenta il tempo, quello verticale la frequenza di ricezione, espressa in Hz, del segnale in banda-base all'uscita del ricevitore. L'intensità del fenomeno (espressa in una scala di potenze relative di segnale) è visualizzata secondo una scala di falsi colori (rappresentata nella legenda riportata in altro a sinistra di ogni spettrogramma) dove i colori chiari indicano potenze più elevate del segnale ricevuto. Questo tipo di rappresentazione è molto comoda ed efficace per l'analisi, dato che consente di visualizzare a "colpo d'occhio" l'evoluzione spettrale delle tracce meteoriche: con un minimo di pratica sono facilmente distinguibili le caratteristiche peculiari del fenomeno analizzato (le cosiddette "firme spettrali") ed alcuni parametri come la velocità relativa della traccia, rispetto all'osservatore, che si deduce dagli spostamenti in frequenza del segnale per effetto Doppler.

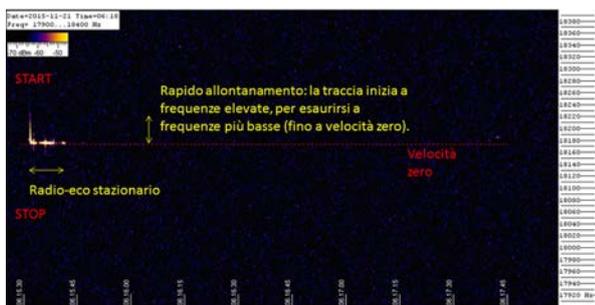


Figura 10: La forma caratteristica a "L" di questa traccia è indicativa di una meteora che, mentre si allontana rapidamente dall'osservatore (tratto verticale), si arresta (velocità relativa zero) e genera un livello di ionizzazione sufficiente da mantenere un'eco stazionario per qualche secondo.

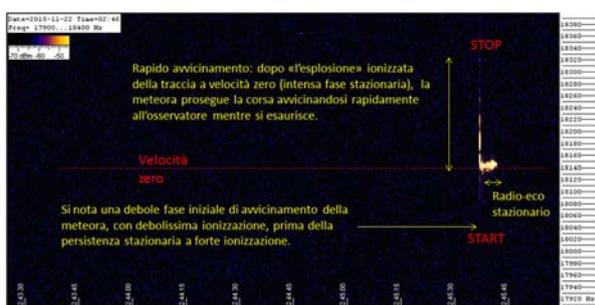


Figura 11: Meteora con comportamento simile al precedente, ma con movimento contrario rispetto all'osservatore.

La figura 14 mostra il conteggio di eventi "radio-meteorici" registrati con continuità giornaliera dalla stazione fissa *RALmet* nel periodo novembre 2015 - giugno 2016. Si notano i principali sciami meteorici del periodo: durante i previsti giorni di massimo, il numero di eventi registrati aumenta rispetto al valore di fondo dovuto al flusso sporadico. Degno di nota è il sensibile incremento di radio-bolidi registrati durante il mese di maggio (figura 15).

La figura 16 mostra la variazione diurna del numero di radio-meteorite registrate dalla nostra stazione: come previsto, si verifica un picco di attività fra mezzanotte e l'alba. Durante la notte, infatti, l'osservatore che si trova nella parte dell'emisfero terrestre in moto frontale rispetto al flusso meteorico, registra una maggiore velocità relativa di impatto delle meteorite con l'atmosfera che incrementa il tasso di ionizzazione da ablazione (quindi un numero maggiore di radio-echi registrati dal radar bi-statico). Il contrario avviene durante il pomeriggio, quando l'osservatore si trova nell'emisfero terrestre opposto rispetto alla direzione di impatto del flusso meteorico.

La sperimentazione continua: lo scopo principale



Figura 12: Configurazione multipla e complessa di traccia ionizzata, simile a quelle viste in precedenza, con tratto verticale molto debole e separazione dell'intensa ionizzazione stazionaria probabilmente dovuta a venti in quota.



Figura 13: Questo è l'evento più significativo registrato nel mese di novembre 2015. Si tratta di una traccia ionizzata stazionaria (cioè a velocità nulla) della durata di circa 1 minuto, prodotta da una meteora di importanti dimensioni.

della stazione fissa *RALmet* è quello di catalogare le "firme spettrali" di radio-echi meteorici notevoli, conteggiare il numero di eventi giornalieri per lunghi periodi di tempo (ad esempio, un anno) evidenziando i principali sciami meteorici dell'anno e le loro variazioni durante un periodo di qualche anno, conteggiare il numero di bolidi o, in generale, di eventi notevoli che si verificano ogni mese. Si tratta di un'osservazione continuativa con obiettivi a lungo termine. Il sistema registra una grande quantità di dati che devono essere analizzati, catalogati e conteggiati: è allo studio un sistema automatico per la gestione del conteggio e la produzione di allarmi nel caso siano rivelati eventi notevoli.

La stazione mobile per le osservazioni "sul campo"

Oltre alla stazione fissa, è stata costruita un'altra stazione ricevente mobile (figura 17), sintonizzata sempre sulla frequenza 143.050 MHz e attivata saltuariamente a scopo dimostrativo durante i periodi di ricorrenza dei principali sciami meteorici.

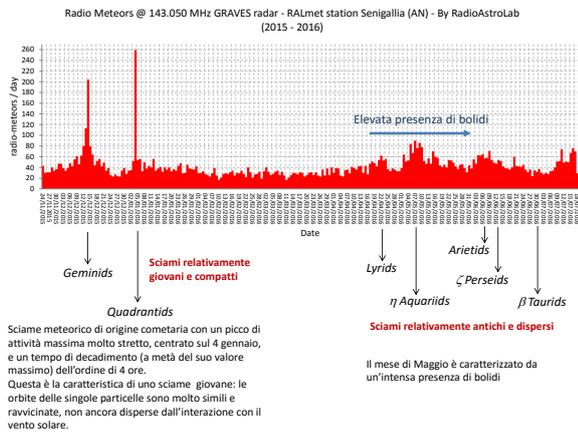


Figura 14: Conteggio di eventi "radio-meteorici" registrati dalla stazione fissa RALmet con continuità giornaliera dalla nostra stazione fissa nel periodo novembre 2015 - giugno 2016.

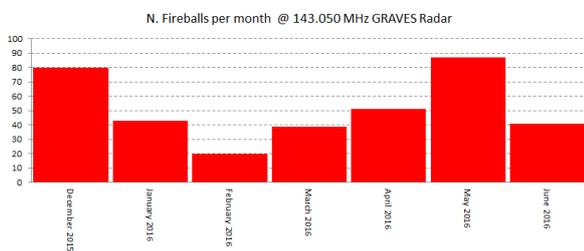


Figura 15: Numero di "radio-bolidi" osservati ogni mese.

Il sistema ricevente utilizza un'antenna yagi a 3 elementi appositamente costruita, accordata sulla frequenza di 143.050 MHz e posizionata sul tetto di un'autovettura tramite un supporto orientabile facilmente maneggevole. Si è utilizzato questo tipo di antenna perché semplice ed economica da costruire, caratterizzata da un guadagno adeguato e da un lobo di ricezione non troppo stretto per non limitare eccessivamente il campo di vista.

Il ricevitore è del tipo SDR che riceve la tensione di alimentazione direttamente dalla porta USB di un PC portatile utilizzato per l'acquisizione. Grazie alla sua flessibilità e compattezza, questa attrezzatura è stata utilizzata con successo per le dimostrazioni pubbliche "sul campo", in parallelo alle osservazioni ottiche quando ricorrono i più importanti sciame me-

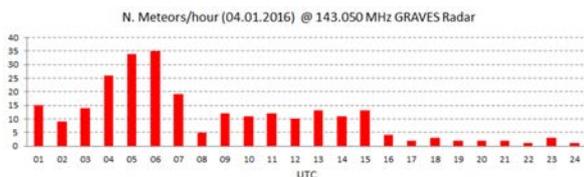


Figura 16: Variazione diurna del numero di radio-meteor.

teorici dell'anno: è interessante e didatticamente utile mostrare l'evoluzione del fenomeno meteorico nella banda radio in parallelo alle tradizionali osservazioni visuali, catturando l'attenzione dell'osservatore sulla dinamica della traccia prodotta da una meteora, esaltata dalla capacità di visualizzazione in tempo reale dello spettrogramma. In effetti, lo scopo di questi esperimenti è quello di mostrare la forma e l'evoluzione della traccia ionizzata prodotta dall'impatto dei meteoriti con l'atmosfera.

Le seguenti immagini mostrano alcune osservazioni effettuate in occasione dello sciame delle Perseidi (Agosto 2015). Sono particolarmente interessanti i confronti fra le registrazioni degli stessi eventi meteorici effettuate da osservatori indipendenti, posizionati in località geografiche distanti fra loro ed equipaggiati con diverse attrezzature. Nonostante gli sfasamenti temporali dovuti alla mancanza di sincronizzazione dei computer, sono evidenti le correlazioni fra gli eventi registrati e si riconoscono agevolmente le loro "firme" spettrali.

L'analisi di queste registrazioni suggerisce interessanti possibilità di studio che si possono sviluppare attivando un monitoraggio coordinato (ed accuratamente sincronizzato) di eventi meteorici fra stazioni distanti.

La figura 22 mostra un esempio di possibile correlazione fra un'osservazione visuale (non si è fotografato l'evento ma si sono annotati alcuni particolari distintivi durante il suo verificarsi) e la corrispondente registrazione radio dello stesso fenomeno.



Figura 17: Stazione mobile per l'osservazione radio delle meteore.

Riferimenti bibliografici

- [1] F. Verniani. Il fenomeno meteorico: aspetti teorici ed applicazioni. *Radio Rivista*, n. 9, Settembre 1972.
- [2] G. Pupillo, C. Bortolotti, M. Roma. Sistema a uso didattico per la ricezione di echi radar meteorici. *Technical Report IRA 483/14*.

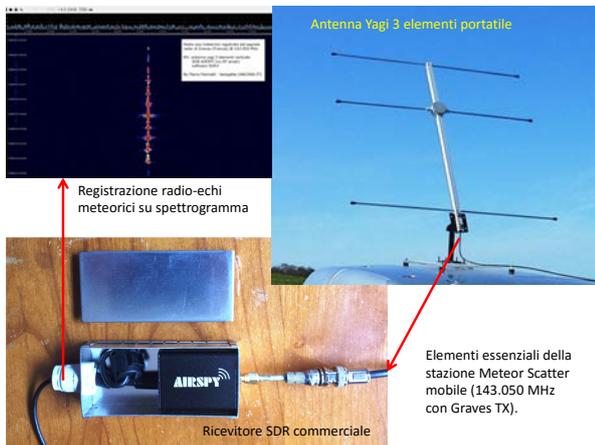


Figura 18: Particolari della stazione mobile per Meteor Scatter.

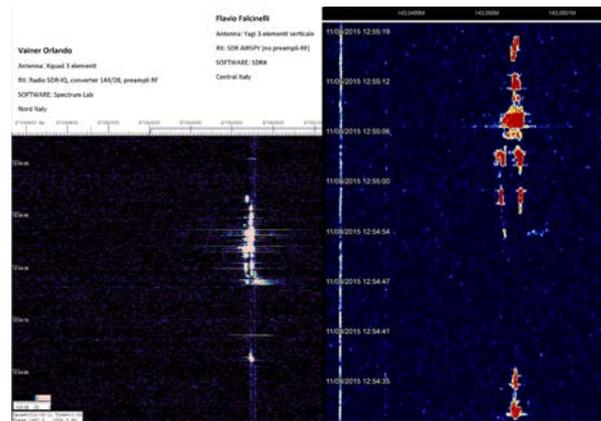


Figura 20: Evento registrato da due stazioni indipendenti (Perseidi 2015).

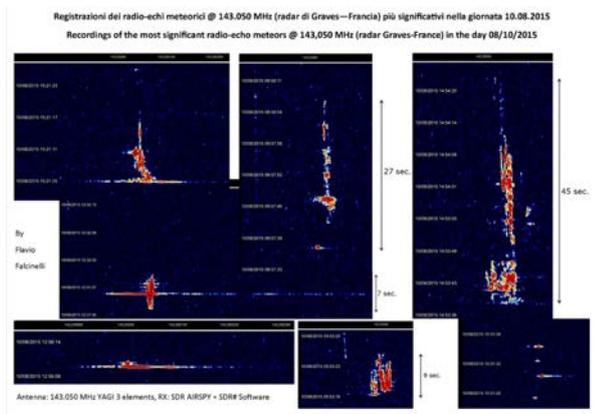


Figura 19: Radio-echi significativi registrati nella giornata 10.08.2015 (Perseidi).

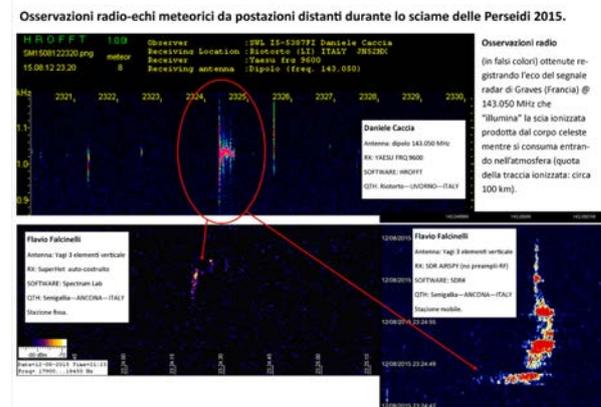


Figura 21: Evento registrato da tre stazioni indipendenti (Perseidi 2015).

- [3] J. M. Wislez Forward scattering of radio waves off meteor trails. *Proceedings IMC, Brandenburg 1995.*
- [4] I. Yrjola, P. Jenniskens Meteor stream activity: a survey of annual meteor activity by means of forward meteor scattering. *Astronomy and Astrophysics, 1998.*
- [5] D. Morgan Detection and Analysis of Meteors by RADAR (Using the GRAVES space surveillance transmitter). *Com. privata.*
- [6] T. Pintér, J. Kákona, M. Kákona, L. Krivský Radio Meteor Scattering with Software Defined Radio based on Open Hardware. *Com. privata.*

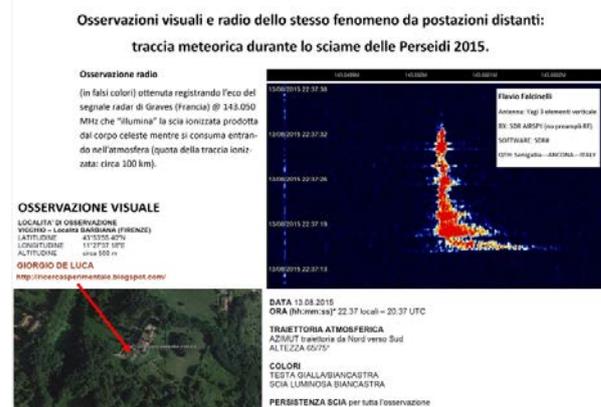


Figura 22: Possibili correlazioni fra osservazione visuale di meteore (Perseidi 2015) effettuate da Giorgio De Luca a Barbiana (FI) e osservazione radio effettuata dalla stazione mobile a Senigallia (AN).