

Meteore in radio con particolare riferimento alle meteore extrasolari

IARA, SdR RadioAstronomia UAI, Astronomia Valli del Noce, Società Italiana di Fisica, IMO

Vi sono molti metodi per l'osservazione e l'indagine delle meteore. Storicamente sono stati usati metodi visuali successivamente sostituiti da tecniche più raffinate quali la fotografia e in seguito utilizzando apparecchiature elettroniche. Nonostante vi siano diversi modi per effettuare una simile indagine, tra i più efficaci e utilizzati vi è sicuramente l'utilizzo del radar, il cui eco è dovuto alla scia ionizzata che si verifica grazie al processo di ablazione attraverso il quale le molecole d'aria staccano molecole dalle meteore e ne provocano dissociazione e ionizzazione.

Il radar più comune è caratterizzato dal fatto che il trasmettitore e il ricevitore sono posti nello stesso luogo e fanno parte integrante di un unico complesso. Questo tipo di radar è detto *monostatico* o *a retrodiffusione (backscatter)*. In tal caso l'onda trasmessa si riflette specularmente sulla traccia ionizzata e viene registrata da un sistema ricevente situato nello stesso luogo del ricevitore. Se il ricevitore e il trasmettitore sono posti in due località separate, fino a 200 km di distanza, il radar è detto *bistatico* o *a diffusione in avanti (forward scatter)*. Se poi si ha più di un ricevitore è possibile realizzare un radar *multistatico*. Alcuni fattori hanno impedito lo sviluppo di tali strumenti, soprattutto la complessità della geometria per la localizzazione del bersaglio e la difficoltà di sincronizzare i sistemi trasmittente e ricevente per misurare l'effetto doppler dovuto allo spostamento della traccia ionizzata causato dai venti di alta quota. A vantaggio di quest'ultimo sistema è il fatto di poter lavorare con onde continue che permettono di avere un'ampiezza di banda molto contenuta, con incremento della sensibilità e minor influenza da parte di sorgenti radio esterne, e di avere una risposta temporale dell'eco molto più lunga.

Analizzando brevemente i processi che producono la scia ionizzata lasciata dalle meteore, in primis si vede come il processo di ablazione inizi nella regione E della ionosfera ad un'altezza di circa 100 km e termini dopo circa 10 km. In tale zona l'energia cinetica di una meteora tipica è un centinaio di volte maggiore della sua energia di legame che è dell'ordine dell'elettronvolt e questo evidenzia come la grandissima parte delle meteore sia destinata ad evaporare nell'atmosfera. Il fatto che il cammino libero medio in tale regione sia di qualche centimetro, confrontato con la dimensione media delle meteore che è circa un millimetro, fa sì che non vi sia la formazione di un fronte d'onda, infatti il processo collisionale può essere visto come una serie di urti singoli anelastici tra

le molecole d'aria e quelle della meteorite che provocano il riscaldamento di queste ultime. La meteora vaporizza e i suoi atomi mantengono la medesima velocità finché successivi urti con le molecole d'aria non ne causano un rallentamento. Quest'ultime collisioni sono le responsabili della scia di gas ionizzato e della successiva emissione di luce per ricombinazione degli ioni. Tale fenomeno, in campo radio, è accompagnato dalla formazione di una scia di plasma di diametro dell'ordine dei centimetri e di lunghezza della decina di chilometri, che segue la meteora e che svanisce rapidamente. Tale scia è paragonabile ad un cilindro metallico riflettente, che, una volta investito da un'onda radio abbastanza lunga, inizia ad oscillare e ad emettere.

L'equazione della potenza radar per tali oggetti risulta essere:

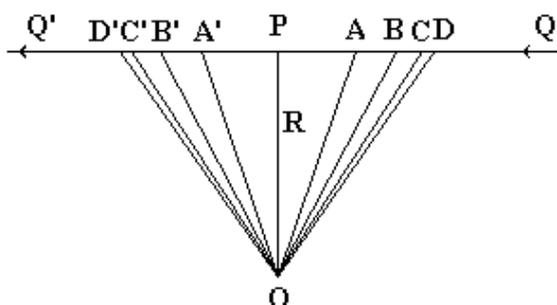
$$P_r = \text{cost. } q^2 P_t G^2 A \lambda^3 / d^3$$

dove q è la densità lineare elettronica, P_t la potenza trasmessa, G il guadagno dell'antenna, A la sua area e d la distanza. Da notare che tale equazione differisce da quella generale del radar: $P_r = \text{cost. } P_t G A s / d^4$. Il massimo del segnale si ha quando la scia è perpendicolare alla direzione di emissione. Un'altra cosa interessante, che l'equazione esprime, è il fatto che la potenza aumenta col cubo della lunghezza d'onda. Tale parametro è molto importante in quanto la durata e la frequenza aumentano più o meno col quadrato di tale parametro. Una frequenza intorno ai 30 – 40 MHz risponde bene ai requisiti necessari. D'altra parte è sconsigliabile scendere sotto i 30 MHz per non incorrere in disturbi causati dall'elevata propagazione ionosferica e non è permesso scendere sotto i 15 MHz a causa del forte assorbimento della regione D della ionosfera.

Tutti gli oggetti minori, che si trovano nel sistema solare, si ritiene siano nati dalla medesima nebulosa che diede origine al Sole ed ai pianeti. Tale affermazione la si può fare e ritenere valida perché non è mai stata riscontrata, in asteroidi o comete, una velocità superiore a quella di fuga del sistema solare, tuttavia nulla vieta di pensare che vi siano oggetti che provengono dal mezzo interstellare o da addirittura altri sistemi stellari. Infatti, come alcune comete sono state espulse dal sistema solare per opera della gravità del sole, così si può ritenere che vi sia un flusso di oggetti di origine extrasolare che penetra in esso. Tali oggetti si deve pensare che siano per la loro quasi totalità delle

particelle minuscole che non appena entrano in contatto con l'atmosfera terrestre vengono identificate come meteore. A sostegno di questa ipotesi, la sonda Ulysses ha trovato nei pressi di Giove un flusso di particelle identificate, attraverso la loro velocità e traiettoria, come di origine interstellare.

È possibile ricavare il flusso di particelle che entrano in atmosfera e da questo discernere quelle di origine extrasolare attraverso la tecnica radar, che per calcolare le caratteristiche delle meteore, prima fra tutte la velocità, si basa sulla diffrazione di Fresnel. Tale tecnica fu introdotta da Herlofson e si basa sull'analogo effetto in campo ottico.



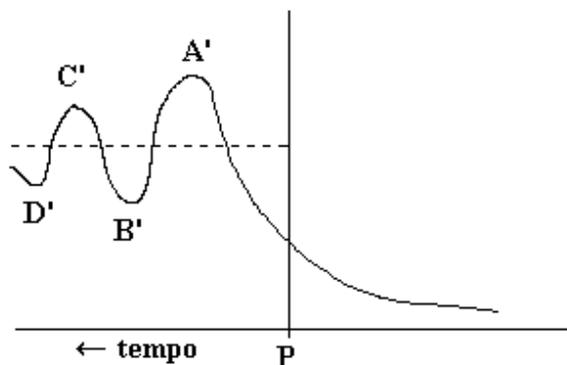
Nella figura, O rappresenta il punto di osservazione mentre QQ' è la colonna ionizzata formata dalla meteora e P il punto dove cade la perpendicolare del segnale. Nel grafico si ha

$$OA = OA' = R + \lambda/4$$

$$OB = OB' = R + \lambda/2$$

$$OC = OC' = R + 3\lambda/4$$

$OD = OD' = R + \lambda$, eccetera dove ovviamente R è la distanza tra il radar e la scia ionizzata che può essere misurata misurando il tempo di andata e ritorno del segnale sapendo che questo viaggia alla velocità della luce. Gli elettroni all'interno del cilindro cominciano a muoversi e ad irradiare in tutte le direzioni e dunque anche verso il radar. Dato che i cammini percorsi da queste onde saranno diversi si potranno avere situazioni di massimo e minimo d'intensità.



L'ampiezza scatterata, vedi figura, è praticamente nulla fino a quando la meteora non entra nella zona AP, fino al massimo in A', per poi decrescere fino B' e poi riprendere a risalire, e così via. L'andamento previsto e trovato è quello mostrato nel grafico. La distanza tra il

minimo e il massimo è facilmente ricavabile, dato che sono state utilizzate delle forti approssimazioni nello studiare il fenomeno, utilizzando semplicemente il teorema di Pitagora ed eliminando i termini di ordine superiore. La distanza tra il primo massimo (A') e il primo minimo (B') risulta essere pari a:

$$PB' - PA' = 0.3 \sqrt{\lambda R}$$

Se la meteora viaggia a velocità V, essa deve coprire questa distanza in un tempo t:

$$t = \frac{0.3\sqrt{\lambda R}}{V}$$

Facendo un semplice esempio, se $V = 40$ km/s, $R = 100$ km e $\lambda = 4$ m, risulta $t = 3.25$ millisecondi. Questo esempio suggerisce che il segnale radar deve essere emesso almeno una volta ogni millisecondo affinché si possa fare un'analisi accurata dei dati.

Affinché una meteora sia di origine extrasolare deve avere una *velocità misurata* V di circa 73 km/s o superiore (limite di orbita parabolica), pari a una *velocità reale* v di 42.1 km/s. Per capire meglio questi dati si consideri che la velocità misurata V di una meteora che entra nell'atmosfera, detta geocentrica, è una combinazione della sua velocità reale attorno al sole v, detta eliocentrica, e di quella della Terra W, pari a 29.8 km/s. Come si vede V può variare tra $W - v$ e $W + v$. I calcoli mostrano che per una meteora che si trovi in orbita parabolica, considerando la sola attrazione solare, si ha $v = W \sqrt{2}$ e dato che si conosce il valore di W si deduce che $v = 42.1$ km/s. Questo è il limite di parabolicità che corrisponde a $V = 72$ km/s, il quale, se si introducono calcoli più raffinati contenenti l'attrazione terrestre, portano il valore a 73 km/s.

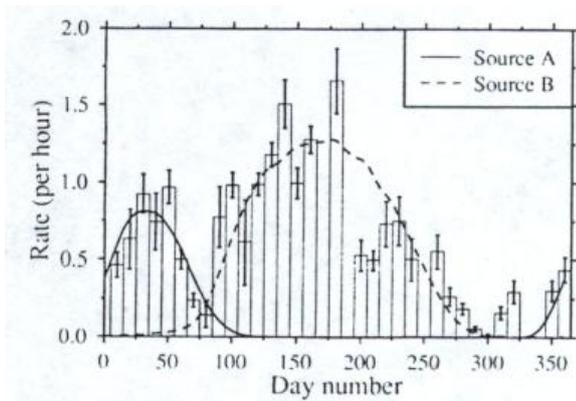
Da una campagna osservativa del 1990/91 condotta su un campione di 350000 meteore (Taylor, Baggaley, Steel, Nature, 380, p. 323, 1996) è emerso che il 14% di esse presentano una velocità superiore ai 73 km/s. Tuttavia il problema è capire quante di queste particelle siano veramente di origine extrasolare e non aventi orbite legate affette da un grande errore di misura. Per evitare possibili errori gli autori della ricerca hanno analizzato meteore con velocità maggiore a 100 km/s e hanno trovato che il numero di esse è circa 1% del totale. Questa scelta è avvalorata dal fatto che la stima dell'errore sulla misura della velocità σ è stata ricavata essere pari a circa 6 km/s con dati che presentavano un'incertezza fino a 3σ . Questa drastica approssimazione, ma inevitabile a causa degli strumenti d'indagine, fa pensare che il maggior numero di particelle extrasolari sia stato escluso dalla ricerca. Dopo le opportune stime, è stato ricavato per gli oggetti selezionati una velocità media di circa 140 km/s.

L'esperimento presentava una magnitudine limite M_{lim} pari a 12.5 e in prossimità di tale valore le meteore erano più piccole di quelle provenienti da orbite legate dalle dimensioni ordinarie di circa 100 μ m. Verniani ha

determinato una relazione empirica tra la *densità lineare elettronica* q (in m^{-1}), la *massa* m (in g) e la *velocità della meteora* v (in m/s):

$$q = 0.0509 m^{0.92} v^{3.91}$$

Alla M_{lim} si trova un $q = 2.5 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ e assumendo le meteore sferiche e di densità pari a 1 g/cm^3 , si trova che a $v = 100 \text{ km/s}$ la più piccola meteora rilevabile ha un diametro di circa $40 \mu\text{m}$, mentre a $v = 200 \text{ km/s}$ ne ha uno di circa $15 \mu\text{m}$. Le osservazioni del vicino infrarosso richiedono un flusso di particelle di dimensioni di circa $30 \mu\text{m}$, mentre le sonde Pioneer 10 e 11 hanno trovato un flusso di particelle dell'ordine di $10 \mu\text{m}$, valore quest'ultimo che nell'esperimento effettuato dagli autori non è previsto essere rilevabile.

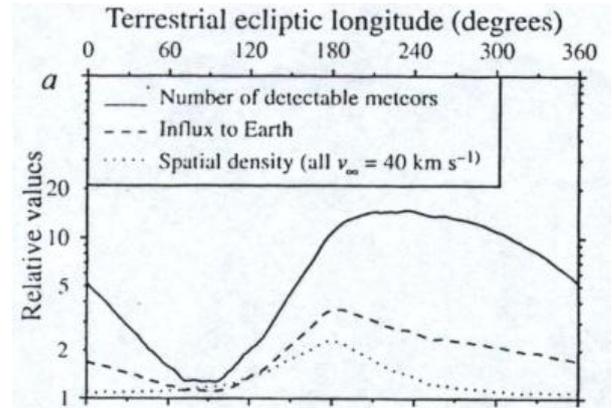


L'andamento stagionale presenta una struttura bimodale in cui si trovano due strutture i cui picchi sono centrati rispettivamente nei giorni 32 e 170. Quest'ultima struttura può a sua volta essere vista come formata da due sottostrutture aventi il proprio picco nei giorni 150 e 225. Il fatto che praticamente non vi siano particelle tra i giorni 260 e 350, quando la Terra si muove lontano dall'apice del moto solare, è una forte evidenza che queste siano di origine extrasolare. Tale andamento può essere spiegato come uno stagionale cambiamento della geometria relativa al vettore del moto terrestre e la direzione della sorgente. Il grafico evidenzia come il primo picco sia più piccolo rispetto al secondo e questo si traduce nel fatto che la sorgente associata ad esso presenta una velocità inferiore di circa 20 km/s . Per cercare l'ubicazione di queste due sorgenti si assume che queste meteore provengano da una direzione definita dalla *latitudine eclittica* β e *longitudine* λ con una *velocità iniziale* v_{∞} . Il grafico è stato interpolato dagli autori con due sorgenti aventi i seguenti dati:

- sorgente A (picco nel giorno 32): $\beta = 30^\circ$, $\lambda = 240^\circ$ e $v_{\infty} = 40 \text{ km/s}$;
- sorgente B (picco nel giorno 170): $\beta = 30^\circ$, $\lambda = 0^\circ$ e $v_{\infty} = 80 \text{ km/s}$.

È stato rilevato che variando β tra 0° e 60° il risultato cambia di poco, in altre parole vi è una grande indeterminazione sul valore di β . Il centro gravitazionale aumenta la densità rispetto a quella nel

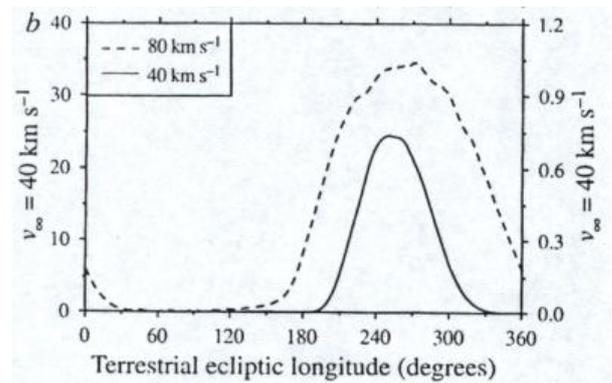
mezzo interstellare, concentrando questa polvere dalla parte opposta del Sole rispetto alla sorgente.



La figura mostra la densità spaziale a 1 AU come funzione della *longitudine eclittica terrestre* L rispetto agli influssi della ipotetica sorgente A. Quando $180^\circ < L < 360^\circ$ il moto terrestre va verso la sorgente producendo un innalzamento del flusso. Ciò è dovuto al fatto che la velocità varia e con essa la massa limite delle meteore rilevabili. Infatti per ogni q e v esiste una massa minima m_{min} che permette di osservare le meteore. Il numero di osservazioni N è:

$$N(m > m_{\text{min}}) = k m_{\text{min}}^{-\alpha}$$

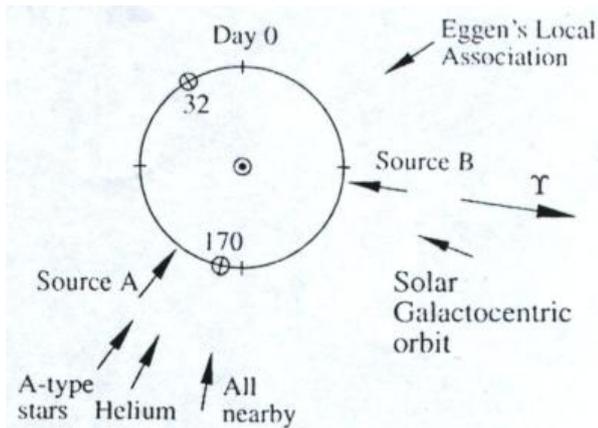
dove α è l'indice di massa cumulativa e k una costante. Nell'interpretazione dei dati è stato usato $\alpha = 0.6$. Il valore di α influenza poco la forma della curva dei due grafici, ma molto la potenza della sorgente a diverse v_{∞} . Un'analisi dimostra che nell'intorno a 270° sono rilevabili 16 volte più meteore.



La figura mostra l'andamento teorico di meteore rilevabili dalla medesima sorgente A ma aventi v_{∞} differenti, rispettivamente 40 e 80 km/s e ciò dimostra che le sorgenti di polvere interstellare di alta velocità sono fortemente favorite dalla selezione della velocità, ma il grafico rappresenta le due sorgenti, A e B, differenzialmente shiftate in longitudine e scalate di un fattore 1.1 (A) e 0.037 (B). Ciò suggerisce che la densità spaziale della sorgente A sia circa 10^3 volte più grande che quella della sorgente B.

La figura è un sommario delle varie ipotetiche sorgenti. Il moto solare relativo alle stelle vicine è diretto verso

la latitudine galattica $b = 23^\circ$ e longitudine $l = 52^\circ$ corrispondente a $\beta = 50^\circ$ e $\lambda = 269^\circ$ in prossimità della locazione della sorgente A. Solamente per stelle di tipo A si avrebbe un picco in corrispondenza del giorno 34. Molte sono le possibili candidate a sorgenti di polveri, infatti vi sono molte stelle che presentano un particolare disco protoplanetario dove le collisioni e la pressione di radiazione producono l'espulsione della polvere. La sorgente A è racchiusa da regioni di elio neutro, che è la causa del flusso di particelle di $0.4 \mu\text{m}$, ma queste le ha rilevate la sonda Ulysses ma non l'esperimento preso in esame.



La sorgente B è associata con le più veloci meteore ed è nei pressi dell'orbita galattocentrica solare a $b = 0^\circ$ e $l = 90^\circ$ cioè a $\beta = 60^\circ$ e $\lambda = 347^\circ$. Tale punto è identificato dal giorno 154 che si discosta da quello del picco osservato che è il giorno 170. Questa sorgente tuttavia potrebbe essere composta da due sorgenti discrete indipendenti, una con picco nel giorno 150 e l'altra in quello 225. Secondo Eggen quest'ultima sorgente è un'associazione di stelle giovani che si muove nei pressi del Sole.

È dimostrata l'esistenza di un flusso di piccoli meteore di dimensioni $15 - 40 \mu\text{m}$ circa che provengono dal mezzo interstellare, originato da alcune sorgenti discrete che si trovano in vicinanza del Sole. Tuttavia un'analisi più dettagliata e condotta su un maggior numero di campioni effettuabile eliminando in parte le cause di indeterminazione porterebbe senz'altro a migliori risultati.