

Convegno Nazionale
Matematica senza Frontiere
Lecce, 5-8 marzo 2003

Sistemi radar per la rilevazione di corpi cosmici vicini: predicibilità e modellistica

Giuseppe Pupillo¹, Giordano Cevolani²

¹DET, Via di S. Marta, 3, 50134 Firenze / Osservatorio di Campi Salentina, Lecce

²CNR-ISAC, Via Gobetti, 101, 40129 Bologna
g.pupillo@isac.cnr.it

1 Introduzione

Il radar è un potente mezzo d'indagine per lo studio dei corpi del sistema solare. Si calcola che ogni anno la Terra riceva mediamente una massa compresa tra le 150.000 e le 200.000 tonnellate di materiale interplanetario il cui impatto sulla superficie terrestre avrebbe conseguenze disastrose per il nostro pianeta se l'atmosfera non esercitasse un'insostituibile azione di schermo.

La maggior parte di questa massa è costituita dalla polvere cosmica e dai meteoroidi che dissipano quasi totalmente la loro energia in atmosfera, ma sono frequenti gli eventi in cui oggetti con dimensioni non trascurabili entrano in atmosfera, e possono raggiungere il suolo. I meteoroidi sono prodotti da una moltitudine di processi fisico-dinamici strettamente legati all'evoluzione delle comete e asteroidi, che rappresentano i loro corpi genitori.

È essenziale conoscere la loro distribuzione di massa e di composizione mineralogica, le loro zone di origine, e comprendere se la popolazione attuale di questi oggetti rappresenta uno stato stazionario.

Dai modelli fisici attualmente in uso, si evince che la distribuzione di massa dei corpi interplanetari che entrano in atmosfera, segue una legge di potenza inversa ben definita, nel senso che sono molto più numerosi i corpi di taglia minore, che occupano un ampio spettro di massa (più di 15 ordini di grandezza!) all'interno della materia interplanetaria (Fig.1)

Questi modelli non rendono però conto completamente delle variazioni osservate con tecniche diverse (sonde spaziali, radar, sistemi fotografici...) dei flussi di questi corpi che presentano alcune popolazioni instabili. In altri termini, l'estremo superiore della scala delle masse dei meteoroidi (bolidi e i superbolidi) presenta una discontinuità di 1-2 ordini di grandezza tra i meteoroidi più massivi e gli asteroidi propriamente detti.

Il numero impressionante dei corpi interplanetari intorno ai 5-10 metri (circa 150 milioni) ottenuto per estrapolazione dalla distribuzione dei NEO (Near-Earth Objects) in base alle loro dimensioni ed il crescente numero delle esplosioni in atmosfera (*airbursts*) monitorate in questi ultimi 30 anni dai satelliti del Sistema di Difesa degli Stati Uniti, fanno intendere che gli

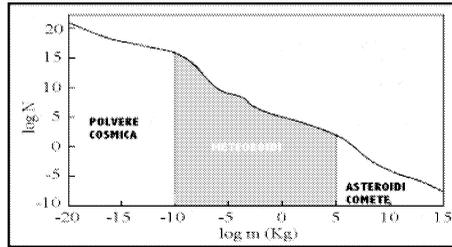


Figura 1: Numero di corpi interplanetari in funzione della loro massa, che entrano in un anno nell'atmosfera terrestre.

oggetti di queste dimensioni vengono distrutti con minore efficacia nei processi di mutua collisione tra corpi interplanetari.

Di fondamentale importanza è lo studio dei fenomeni di interazione in atmosfera e di impatto al suolo del corpo interplanetario. I fenomeni sono strettamente connessi alla composizione e struttura del meteoroido e la possibilità che uno di questi arrivi al suolo è condizionata da una serie di parametri (tipo di materiale, massa iniziale, velocità di avvicinamento alla Terra, inclinazione della traiettoria...).

Le indagini sui flussi degli sciami meteorici provenienti da radianti diversi e connessi allo studio delle orbite dei loro possibili corpi genitori, possono di fatto contribuire agli studi sui NEO ed in particolare dei NEA (Near Earth Asteroids) (Fig.2). Inoltre i parametri dei radioechi, e soprattutto la distribuzione delle durate della tracce, forniscono preziose informazioni sulle condizioni dell'alta atmosfera, i suoi cambiamenti, le variazioni stagionali dei costituenti minori che possono contribuire a delineare il comportamento dell'atmosfera nell'impatto con i corpi interplanetari. Dai radioechi meteorici è possibile risalire alle proprietà dei piccoli corpi (frammentazione, densità, composizione, etc.).

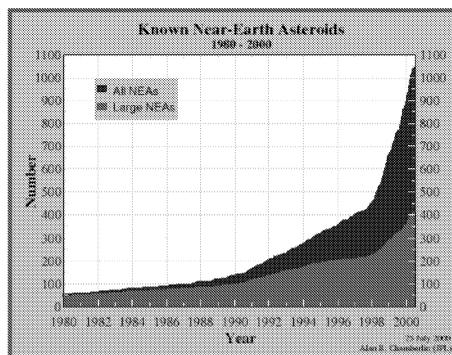


Figura 2: Numero di NEA conosciuti negli anni 1980-2000. I NEA di maggiori dimensioni hanno taglia superiore al chilometro

2 Sistemi radar

Il grande vantaggio della tecnica radar è quello del controllo delle proprietà di coerenza (modulazione nel tempo ed in frequenza) del segnale radio usato per illuminare il bersaglio (traccia meteorica, *space debris*, asteroide/cometa...). Un sistema radar monostatico consta di una singola antenna che, tramite guide d'onda, può essere collegata al ricevitore o al trasmettitore. In questa configurazione, una misura radar inizia con la trasmissione del segnale per un tempo prossimo a quello per la propagazione dell'onda elettromagnetica fino al bersaglio e ritorno. Un sistema multistatico utilizza due o più antenne. Questa configurazione è più efficiente quando il bersaglio è vicino e, quando il segnale è molto forte, permette di eseguire misure interferometriche per raggiungere un'alta risoluzione spaziale.

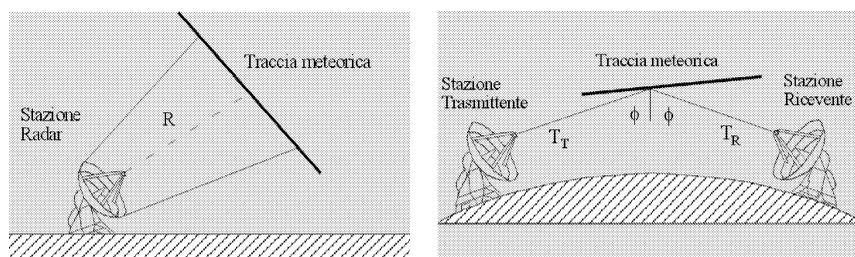


Figura 3: Radar meteorici di tipo monostatico (a *backscatter*) e bistatico (a *forward scatter*) che utilizzano tracce meteoriche ionizzate come bersaglio.

Questa configurazione è più efficiente quando il bersaglio è vicino e, quando il segnale è molto forte, permette di eseguire misure interferometriche per raggiungere un'alta risoluzione spaziale.

(A) Un sistema radar per l'osservazione di meteoroidi

L'Istituto ISAC del CNR utilizza da circa dieci anni un sistema radar meteorico di tipo *forward-scatter*, radar BLM (Fig. 4), operante ad onda continua alla frequenza di 42.770 MHz ed una potenza di trasmissione di 1 kW (Cevolani *et al.*, 2002) Il radar è dotato di una stazione trasmittente posta a Budrio (Bologna), una stazione ricevente dislocata nell'area dell'Università di Lecce, una seconda presso l'osservatorio astronomico di Modra (Slovacchia), ed una terza posta nel territorio di Campi Salentina (LE). I radar meteorici di tipo *forward-scatter* utilizzano la diffusione obliqua delle onde radio in banda VHF da parte delle tracce ionizzate prodotte dall'interazione dei meteoroidi con l'atmosfera terrestre a quote comprese tra 70 e 130 km (mesosfera e bassa termosfera). I radar meteorici presentano molti vantaggi nell'osservazione dei meteoroidi, tra cui:

- disporre di un'elevata sensibilità che permette di osservare l'ingresso

in atmosfera di meteoroidi di massa molto ridotta (dell'ordine del microgrammo).

- non risentire dei disturbi che penalizzano le osservazioni in ottico (condizioni meteo, presenza del chiarore lunare, ecc.);
- poter osservare anche di giorno.

Tutto questo li rende strumenti ideali per monitorare l'attività di sciami meteorici per lunghi periodi di tempo e per effettuare studi sull'alta atmosfera.

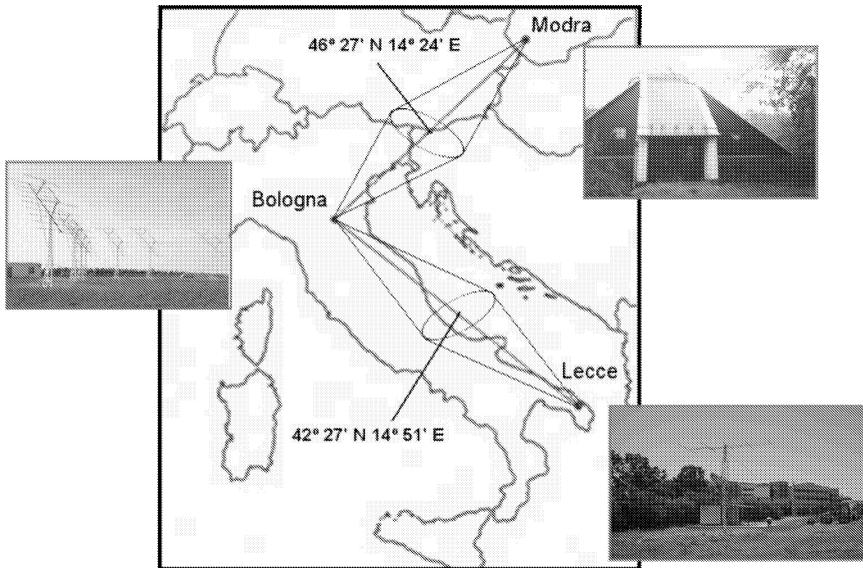


Figura 4: La geografia del radar BLM (Bologna-Lecce-Modra).

La ricerca si è posta come obiettivo lo studio delle anomalie strutturali e la ricerca di possibili correlazioni con i corpi progenitori degli sciami meteorici analizzati. E' stato condotto uno studio sugli *outburst* e *meteor storm* dello sciame delle Leonidi nel corso dell'ultimo ciclo di attività associato al ritorno al perielio della cometa progenitrice Tempel-Tuttle nel Febbraio del 1998 ed un confronto con i più accreditati modelli in grado di prevedere con precisione l'incidenza di questi eventi. È soltanto dal 1999 che sono stati sviluppati nuovi modelli in grado di predire *outburst* e *storm* delle Leonidi. Tutti questi modelli sono basati sulla teoria *multi-trailet* (MTT) di Kondrat'eva e Reznikov (1985).

Secondo questa teoria, la struttura di uno sciame meteorico è altamente disomogenea, essendo formata da un numero di densi filamenti di meteoroidi, ognuno dei quali emesso dal corpo parentale ad ogni ritorno (dopo circa

33.3 anni) al perielio (Fig.5). Per il calcolo della dispersione delle orbite dei frammenti cometari, i modelli numerici tengono conto in modo diverso delle forze gravitazionali dovute ai pianeti e degli effetti non gravitazionali dovuti alla radiazione solare (Cevolani *et al.*, 2000a,b; Pupillo *et al.*, 2000 e 2001).

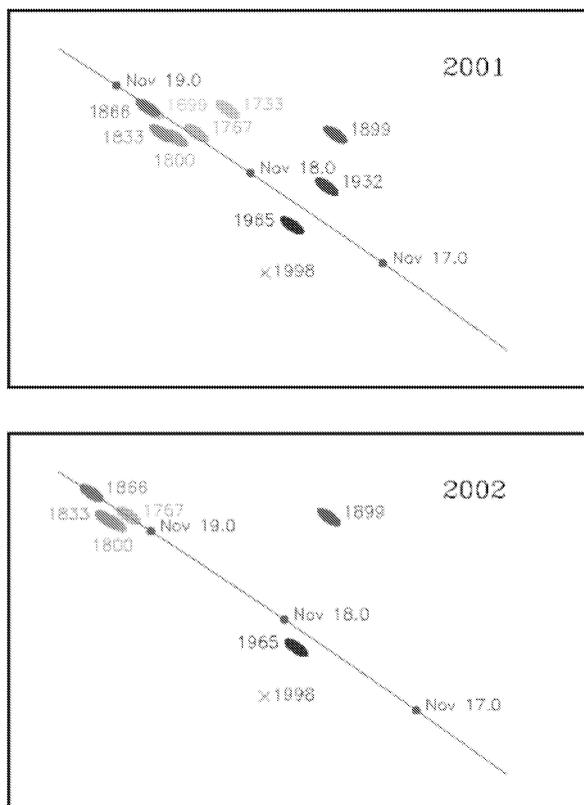


Figura 5: Tempi dei passaggi della Terra (*linea azzurra*) previsti dai modelli attraverso gli addensamenti di polvere cometaria (*dust trails*) lasciati ad ogni passaggio (ogni 33.3 anni) dalla cometa Tempel-Tuttle.

I dati delle osservazioni del radar BLM possono essere utilizzati per testare le previsioni dei modelli. Dal confronto tra i dati osservativi e le deduzioni teoriche dei modelli, si ottiene che gli effetti della radiazione solare hanno un ruolo dominante nella dispersione dei meteoroidi e che inoltre gli effetti non lineari di origine gravitazionale potrebbero essere importanti nella formazione ed evoluzione delle tracce di polvere cometaria.

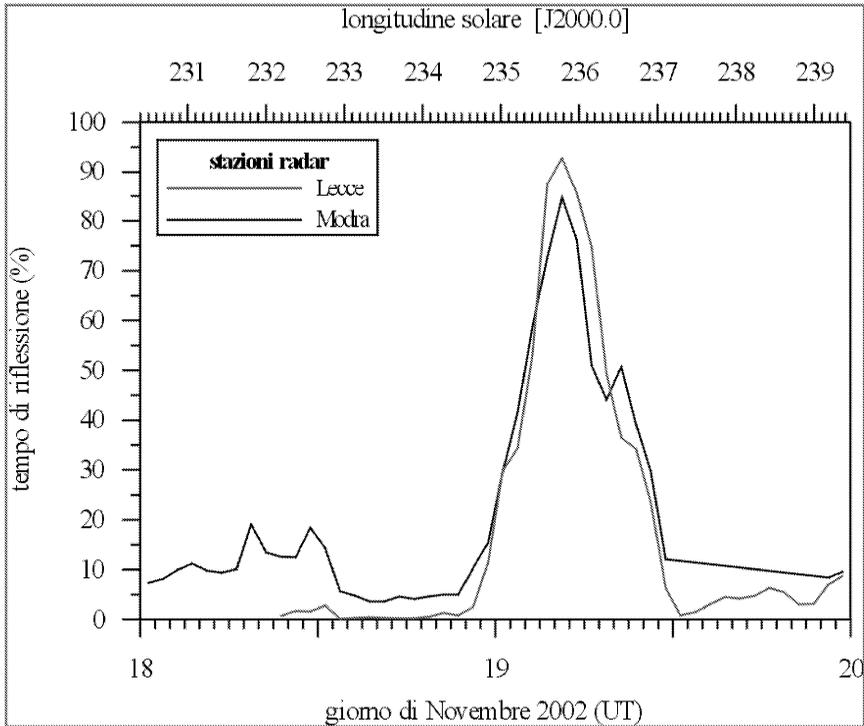


Figura 6: Attività dello sciame delle Leonidi monitorata dalle stazioni radar riceventi di Lecce e di Modra. I due massimi registrati nella mattina del 19 novembre 2002 sono quelli previsti dai modelli e sono relativi ai filamenti lasciati dalla cometa Tempel-Tuttle nei passaggi del 1767 e 1866 (vedi Fig.5).

Le osservazioni delle Leonidi del 2002, condotte dal 13 al 21 Novembre, hanno permesso di rivelare entrambi i massimi principali previsti dai modelli più accreditati (McNaught/Asher e Lyytinen/Van Flandern). Oltre alle Leonidi, le osservazioni di un altro sciame, le Geminidi, effettuate dal 1995 al 2000, hanno fatto registrare una forte attività tra il 13 e il 14 dicembre 1997, non registrata dagli osservatori visuali. Da alcune nostre recenti indagini (Pupillo *et al.*, 2001) sembra che l'attività anomala delle Geminidi nel 1997 sia probabilmente connessa ad un incontro ravvicinato tra la Terra e 3200 Phaeton, l'asteroide progenitore dello sciame delle Geminidi. Se questa ipotesi venisse confermata, sarebbe la prima osservazione di una connessione diretta tra l'attività delle Geminidi e il passaggio al perielio del suo progenitore, finora dimostrata solo sulla base della comparazione dei parametri orbitali di Phaeton e di alcune Geminidi. Ovviamente la conferma della correlazione diretta tra l'attività delle Geminidi e la posizione dell'asteroide necessita ulteriori approfondimenti e possibilmente l'osservazione/previsione di *outburst* in coincidenza di altri incontri ravvicinati tra la Terra e Phaeton.

(B) Un sistema radar per l'osservazione degli *space debris*

Le maggiori Agenzie Spaziali hanno iniziato da tempo programmi di osservazione, di predizione e di protezione per i detriti spaziali, sotto l'egida dell'IADC (Inter-Agency Space Debris Committee), un'associazione cui partecipa anche ASI, che ha per scopo lo scambio di informazioni, il coordinamento del lavoro e l'identificazione di misure di mitigazione in questo campo. Nella ricerca sui detriti spaziali, l'ESA raccomanda da alcuni anni: (a) osservazioni radar da terra degli oggetti di dimensioni centimetriche e millimetriche utili per gli studi sulle strategie di protezione delle navicelle, (b) la messa a punto di modelli di riferimento per i resti spaziali e i meteoroidi, vista l'analogia del loro comportamento, per disegnare in prima approssimazione la mappa del rischio di collisione con questi corpi; (c) calcolo delle probabilità d'impatto dei meteoroidi con i satelliti attualmente in orbita nel caso di attività anomala (*outburst* o *storm*) degli sciami meteorici.

I detriti artificiali (*space debris*) e quelli naturali (meteoroidi) sono un'importante componente dello spazio circumterrestre. In condizioni normali, al di sopra del millimetro, gli *space debris* dominano nettamente sui meteoroidi che invece prevalgono sui primi a dimensioni milli- e sub-millimetriche. La situazione può decisamente cambiare in condizioni di accresciuta attività di alcuni sciami meteorici che possono raggiungere flussi orari eccezionali in corrispondenza del passaggio al perielio dei corpi genitori.

Il problema dei detriti spaziali è stato affrontato in stretta connessione con quello dei meteoroidi. È importante sottolineare che il Meteoroid and Space Debris Environment Reference Model (**MASTER**) è stato aggiornato nel 1999 dall'ESA per determinare il flusso delle particelle che intersecano le orbite dei satelliti nelle regioni LEO, MEO e GEO.

L'estensione del modello al particolato fino alle dimensioni del micron ripropone all'attenzione l'ambiente dei meteoroidi che sono più numerosi a queste dimensioni dei detriti spaziali propriamente detti. Il modello MASTER (Master'99 è stato concepito per determinare il flusso del particolato che interessa le orbite dei satelliti nella regione LEO/ MEO/GEO.

Il modello viene usato per simulare la generazione di oggetti dovuti a tutte le sorgenti conosciute di detriti (Fig.7):

1. frammentazione e collisioni in orbita;
2. prodotti solidi da esplosioni di motori di razzi;
3. refrigeranti da reattori nucleari nello spazio;
4. degradazione delle superfici dei satelliti;
5. getti da impatto di piccole particelle;

6. meteoroidi e sciami a carattere periodico.

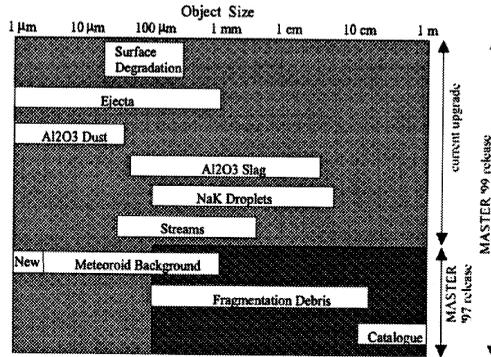


Figura 7: Simulazione di sorgenti conosciute di detriti spaziali con il modello MASTER dell'ESA.

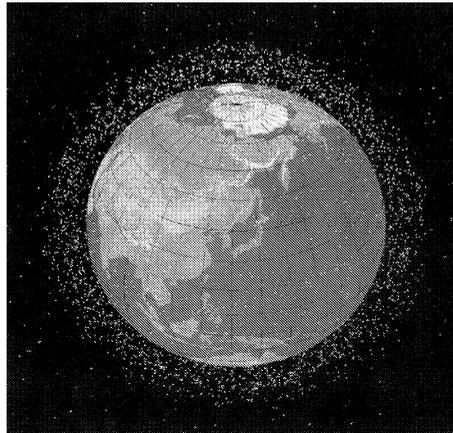


Figura 8: Scenario dei detriti spaziali attorno alla Terra, monitorati dai radar del Comando Spaziale USA.

L'Istituto di Radioastronomia (IRA) del CNR, che dispone delle stazioni di Noto e Medicina (equipaggiate con due parabole gemelle da 32 metri di diametro), ha in corso un progetto di studio e di monitoraggio della popolazione dei detriti spaziali a varie quote, tramite l'osservazione radar dei detriti stessi. Questo genere di esperimento consente di determinare il numero, le dimensioni e la velocità radiale dei detriti in esame, semplicemente eseguendo un'analisi spettrale dell'eco radar riflesso dai corpi in orbita.

Scopo finale del progetto è la costituzione di una rete radar ad alte prestazioni, imperniata sull'installazione di un potente trasmettitore sull'antenna di Noto o sul costruendo Sardinia Radio Telescope (SRT) (Fig.9).

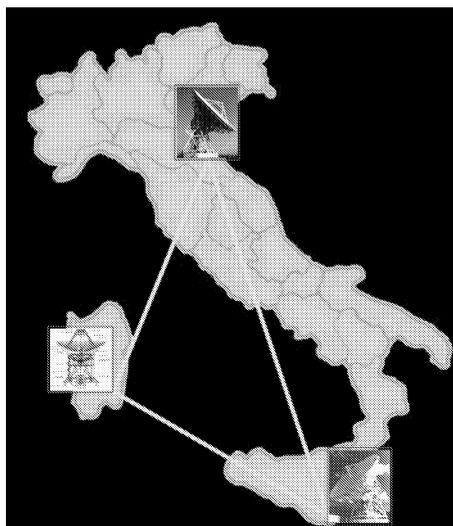


Figura 9: Rete radar costituita dalle parabole di Medicina, Noto e SRT (Sardinia Radio Telescope) che può essere utilizzata per il monitoraggio dei detriti spaziali.

Le prestazioni di una simile configurazione sono state saggiate eseguendo con successo un esperimento in collaborazione con il radiotelescopio di Evpatoria (Ucraina), illuminando il satellite Etalon-1, in orbita ad una quota di 19.000 Km (Fig.10).

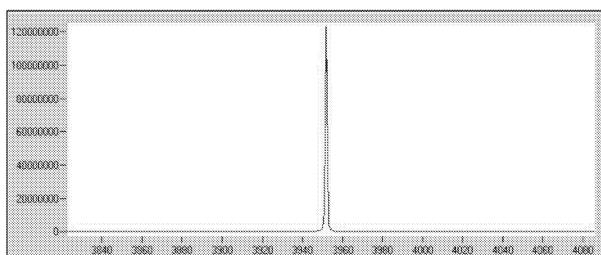


Figura 10: Eco ricevuto dal satellite ETALON-1 (particolare). L'antenna di Evpatoria trasmetteva a 5010.024 MHz, con una potenza di 150 kW. L'eco, analizzato con un software concepito *ad hoc* per lo spettrometro di Medicina (MSPEC0 Post Processor), mostrava un rapporto s/n pari a 6800 (integrazione di 30 secondi). Ascisse: canali - Ordinate: conteggi.

Un radar di grandi dimensioni e con scarsa mobilità è particolarmente adatto per l'osservazione di detriti piccoli per scopi statistici, anche senza determinazione delle loro orbite. Per valutare in generale le potenzialità di un'antenna (per il momento ci si riferisce ad un radar monostatico), caratterizzata da guadagno G , conviene introdurre il rapporto $d/R^2 = 1/L$

tra il diametro minimo d di un oggetto osservabile e il quadrato della sua distanza R . Tale rapporto determina la potenza ricevuta:

$$P_r = \frac{GP}{4\pi R^2} \frac{\pi G' d^2}{4} \eta \frac{\pi D^2/4}{4\pi R^2} = PGG' \eta \frac{(dD/2)^2}{(4R^2)^2} = PGG' \eta \frac{(D/2)^2}{(4L)^2}$$

ove i simboli hanno il seguente significato (abbiamo considerato la banda X a 8,8 GHz e la banda Ka a 32-34 GHz):

P = potenza di picco trasmessa;

G = guadagno dell'antenna: $G_X = 2,1107$ (73,2 dB); $G_{Ka} = 2,3108$ (83,7 dB);

G' = guadagno dell'oggetto: per come abbiamo scritto la formula precedente tale grandezza dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente sull'oggetto (la quantità $\frac{\pi d^2}{4} G'$ altro non è che la *Radar Cross Section*); in prima approssimazione si può assumere $G' = 3$; R = distanza dell'oggetto (*range*); d = diametro dell'oggetto; D = diametro dell'antenna = 64 m; η = efficienza dell'antenna: $\eta_X = 0,6$, $\eta_{Ka} = 0,45$.

Si è trascurata l'attenuazione atmosferica (circa 0,4 dB a due vie in banda Ka, meno di 0,1 dB, sempre a due vie, ad 8,8 GHz).

Per un'osservazione alla distanza zenitale θ e all'altezza h , il diametro minimo individuabile è esprimibile come:

$$d = \frac{R^2}{L} = \frac{h^2}{L \cos^2 \theta}$$

Nel seguito considereremo osservazioni zenitali, con $R = h$. La potenza ricevuta minima rilevabile è, in ordine di grandezza, determinata dal rapporto SNR tra segnale ricevuto e rumore termico del ricevitore:

$$(SNR)kT\Delta f = P_r$$

in cui T è la temperatura effettiva del sistema, k la costante di Boltzmann, pari a $1,38066 \cdot 10^{-23}$ J/K, e Δf la larghezza di banda. Quest'ultima, naturalmente, dipende anche dagli scopi che si intendono raggiungere. Se si desidera misurare la distanza con una risoluzione σ_R in distanza è necessario che $\Delta f \geq c/2\sigma_R$. Per la rivelazione statistica di oggetti di piccole dimensioni è sufficiente una risoluzione grossolana; per $\sigma_R = 150$ km, per esempio, $\Delta f = 1$ kHz, valore consueto per i radar più potenti (come Haystack e Goldstone). Prendendo inoltre $SNR = 2$, $T = 20$ K, abbiamo $P_r = 5,5 \cdot 10^{-19}$ J/s e, con $P = 100$ kW = 10^5 J/s, nella banda Ka otteniamo:

$$\frac{1}{L} = \frac{8}{D} \left(\frac{P_r}{PGG'\eta} \right)^{1/2} = 1,65 \cdot 10^{-17} m^{-1}$$

corrispondente a un oggetto di diametro $d = 2$ mm alla distanza $R = \sqrt{Ld} = 8000$ km e $d = 0,03$ mm alla distanza $R = \sqrt{Ld} = 1400$ km, alla quale si trova un picco nella popolazione dei detriti catalogati e non si hanno

informazioni sugli oggetti più piccoli. E' bene notare che si tratta di una stima molto grossolana ma che evidenzia le grandi potenzialità di SRT.

La stessa strumentazione e le medesime tecniche osservative e di post-elaborazione si possono infatti fruttuosamente applicare alla osservazione radar di asteroidi e comete prossimi alla Terra, come dimostrato dalla collaborazione Goldstone-Medicina con l'osservazione dell'asteroide 1998WT24 nella notte tra il 16 e il 17 dicembre 2001 (Saba *et al.*, 2002). Per la prima volta nella storia della radioastronomia italiana, il segnale riflesso dall'asteroide è stato captato dall'antenna parabolica da 32 metri di Medicina. Scopo dell'esperimento era quello di verificare la sua fattibilità ed il successo raggiunto apre nuove strade nello studio dei corpi planetari, in particolare degli asteroidi che avendo percorsi orbitali prossimi alla terra rappresentano una potenziale minaccia per il nostro pianeta (Figure 11-12).

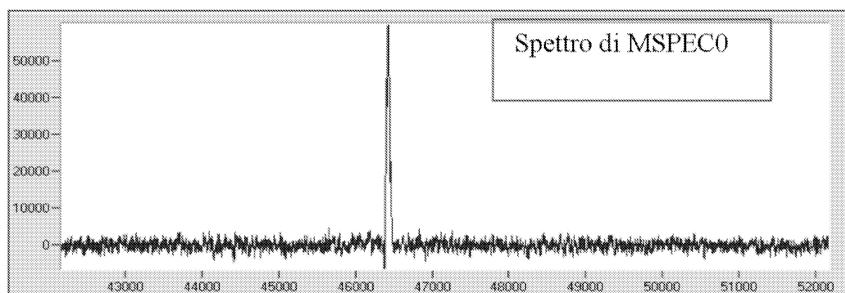


Figura 11: Eco del segnale inviato dall'antenna di Goldstone verso l'asteroide 1998WT24, visto dallo spettrometro MSPEC0 di Medicina. Ascisse: canali - Ordinate: conteggi.

Il sistema MSPEC0 di Medicina è un analizzatore digitale di spettro con una larghezza di banda (BW) di 50KHz che utilizza la Fast Fourier Transform (FFT) sulle serie dei dati che arrivano a 65.536 canali, producendo gli spettri dei segnali. In pratica, il sistema fornisce l'analisi spettrale dei segnali ricevuti a risoluzione estremamente elevata e in tempo reale. La risoluzione in frequenza è circa 7 Hz con una risoluzione della componente della velocità radiale dell'oggetto monitorato di circa 27 cm/s.

Un aspetto interessante è che le osservazioni radar dei detriti naturali condotte con il radar BLM soprattutto durante i frequenti episodi di attività anomala di sciame può inserirsi nel più ampio programma di sorveglianza dei detriti spaziali. I detriti naturali che formano i complessi meteorici di origine cometaria ed asteroidale, presentano un ampio spettro di dimensioni (dal micrometro al metro, e oltre). Per il *tracking* delle particelle millimetriche potrà risultare senz'altro utile l'esperienza e la collaborazione sia in modo integrato che interattivo con il radar meteorico BLM, l'unica

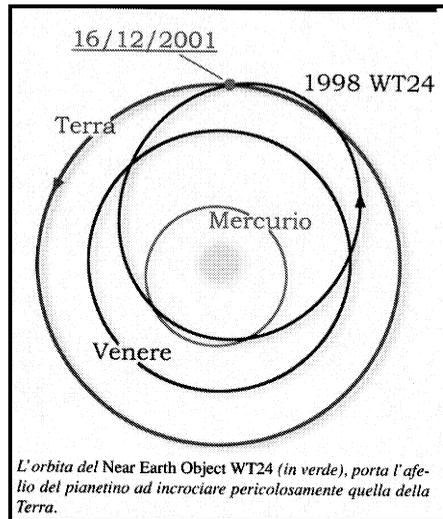


Figura 12: Orbita dell'asteroide 1998WT24.

struttura di questo tipo esistente in Italia dedita all'osservazione sistematica dei meteoroidi a partire dal 1992. Il rilevamento degli oggetti di dimensioni maggiori può essere effettuato con maggiore affidabilità dall'antenna SRT. Alle dimensioni centimetriche vicine a quelle di una CSDS (*Critical Space Debris Sphere*) che rappresenta il limite inferiore nella scala dei proiettili in grado di arrecare seri danni ad una struttura orbitante, è possibile un confronto incrociato per calibrare i flussi ottenuti dai due sistemi radar.

Il completamento del radar con un sistema interferometrico di tipo “*short hop*” (Fig.13) da installare nei dintorni di Lecce darebbe la possibilità di calcolare e localizzare con precisione il numero di oggetti entranti nella nostra atmosfera incluso gli *space debris*, molti dei quali 'decadono' diventando corpi ionizzanti nell'interazione con l'atmosfera. E' senz'altro utile conoscere quanti oggetti di fabbricazione umana 'decadono' nella nostra atmosfera. A tutt'oggi il numero degli oggetti che si sono disintegrati in atmosfera è perlomeno doppio degli oggetti catalogati (8500-9000) dal Comando Spaziale USA (Anselmo *et al.*, 1998). I detriti finora monitorati hanno dimensioni perlomeno di qualche centimetro, ed il numero dei detriti centimetrici e millimetrici che decadono nell'atmosfera è decisamente superiore. Sarebbe interessante effettuare con il radar BLM una volta completato, un'analisi dei profili degli echi e della velocità dei corpi che entrano nell'atmosfera. A completamento del sistema radar Bologna-Lecce, è necessario installare un sistema interferometrico per associare ad ogni eco la sua quota e direzione, misurando in tal modo distanza, altezza, direzione e velocità dei corpi entranti nell'atmosfera. E' importante inoltre capire: (a) quanti oggetti di

taglia diversa esistono attualmente nello spazio circumterrestre in grado di incrociare le orbite dei satelliti posti in LEO e GTO; (b) quale è la loro distribuzione di massa e la loro composizione chimica; e (c) come identificare la sorgente (o le sorgenti) di provenienza di questi corpi.

In sintesi, un sistema interferometrico radar da installare nei dintorni di Lecce darebbe la possibilità di:

1. distinguere un detrito artificiale da quello naturale, dall'analisi della velocità del corpo intrinseco che ionizza l'atmosfera (sono attese velocità di circa 10 km/s per i debris e sopra i 12-15 km/s per i meteoroidi - le Leonidi hanno 7 volte la velocità di una CSDS);
2. valutare il tasso di estinzione dei *debris* estrapolandolo opportunamente su scala globale;
3. conoscere l'altezza di disintegrazione che per i detriti spaziali è in genere più bassa di quella dei normali meteoroidi (i detriti spaziali sono infatti più compatti);
4. valutare la direzione di provenienza dei singoli detriti spaziali oltre che quella dei meteoroidi;
5. studiare la morfologia e la durata dell'eco (eco iperdensa) per ottenere informazioni sulla struttura e composizione dei corpi che hanno generato la riflessione delle onde radio.

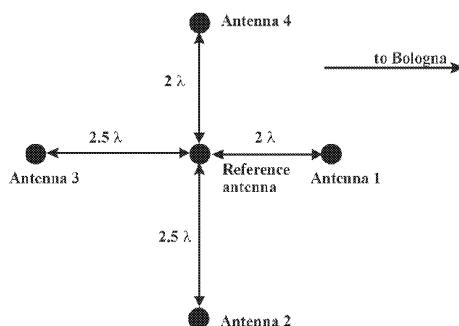


Figura 13: Disposizione delle antenne riceventi dell'interferometro a 5 elementi prevista per il radar BLM.

Riferimenti bibliografici

- [1] L. Anselmo, B. Bertotti, P. Farinella. Uno spazio affollato di detriti. *Le Scienze*, bf 361, 48-55, 1998

- [2] G. Cevolani, G. Pupillo, A. Hajduk, V. Porubcan. Observations of the Leonid meteoroid stream by a multistation FS radio system. *Earth, Moon and Planets*, **82-83**, 265-276, 2000a
- [3] G. Cevolani, G. Grassi, G. Pupillo. Meteor outbursts and storms: the last millennium Leonid storm. *Proc. 3rd Italian Congress of Planetary Sciences*, 23-33, 2000b
- [4] G. Cevolani, G. Bortolotti, G. Franceschi, G. Grassi, A. Hajduk, V. Porubcan, G. Pupillo. Dieci anni di osservazioni di detriti naturali con la tecnica radar a 'forward scatter': risultati e prospettive. *Proc. LXXXVII Congresso Nazionale SIF*, relazione ad invito, 2002
- [5] G. Pupillo, G. Bortolotti, C. Franceschi, G. Grassi, E. Sbenaglia, G. Trivellone, G. Cevolani. Systematic radio observations of the Leonid meteoroid stream by the BLM radar. *Proc. IX Convegno GIFCO*, **68**, 2000
- [6] G. Pupillo, G. Cevolani, G. Trivellone. Mass distribution of the Leonid meteoroid stream and satellite threat by systematic radio observations. *Proc. 3rd European Conference on Space Debris*, ESOC, 231-236, 2001
- [7] G. Pupillo, G. Cevolani, G. Grassi, G. Trivellone. Investigation of the Geminid asteroidal meteor stream by the BLM radar facility. *Mem S.A.It.*, **73**, 756-759, 2002
- [8] E.D. Kondrat'eva, E.A. Reznikov. Comet Tempel-Tuttle and the Leonid meteor swarm. *Solar Syst. Res.*, **19**, 96-101, 1985
- [9] L. Saba, M. Delbo', M. Di Martino, S. Montebugnoli, S. Poppi, S. Righini, S. Ostro, A. Zaitsev, G. Cevolani, A. Carusi. Planetary radar astronomy with SRT. *Proc. 4th Italian Congress of Planetary Sciences*, 107-111, 2002

Ringraziamenti

Si ringraziano G. Bortolotti, C. Franceschi, G. Grassi, S. Montebugnoli, S. Righini, L. Saba e G. Trivellone per la preziosa collaborazione tecnico-scientifica.