

Giannantonio Milani¹, Giovanni Sostero², Roberto Trabatti³, Carlo Vinante⁴

La cometa 9P Tempel 1 nell'apparizione 2005

Monitoraggio durante la fase di impatto della missione *Deep Impact*

¹Sezione Comete UAI-CARA, ²Osservatorio Remanzacco-AFAM, ³Stazione Astronomica Descartes, ⁴CARA

Abstract

*Comet 9P/Tempel 1 was constantly monitored during the 2005 apparition by observers participating in the CARA project (<http://cara.uai.it>). R and I (Cousins), as well as 647-650 nm narrowband filter photometric data were used to produce *Afrho* quantity measurements. *Afrho* value peaked around 300 cm approximately 83 days before perihelion, with a general behaviour that closely matches the one of previous apparitions. Around the time of the impact of the *Deep Impact* module a short temporary increase was detected, but *Afrho* values and the coma profile returned to a normal state within approximately 3 days. The dust cloud produced by the impact was clearly seen in the images obtained on July 4 and 5 as well as a temporary disturbance in the average photometric profile in the coma. No permanent long-time effects were detected in the average *Afrho* behaviour, which matches the trend observed in previous apparitions fairly well.*

Introduzione

Nel 2005 la cometa periodica 9P Tempel 1 è stato oggetto di una specifica campagna osservativa finalizzata sia al monitoraggio generale dell'apparizione, sia allo studio della fase cruciale della missione *Deep Impact*, intorno al periodo dell'impatto del modulo sulla superficie del nucleo. Il programma, svolto seguendo gli standard prestabiliti nell'ambito del progetto CARA (<http://cara.uai.it>), era mirato a ottenere misure fotometriche con diversi filtri e a determinare la quantità *Afrho*, strettamente correlata alla superficie totale (sezione trasversale) coinvolta nella riflessione della luce solare da parte delle polveri della chioma.

Nella fase cruciale dell'impatto sono state ottenute immagini interessanti che mostrano la nube di polveri in allontanamento dal nucleo, visibile anche come un'alterazione nel profilo medio della chioma.

I dati raccolti hanno permesso di delineare in modo completo sia l'evoluzione della cometa nel corso dell'apparizione, sia gli effetti prodotti dall'impatto del modulo sulla superficie del nucleo.

Il raggiungimento di questi obiettivi era stato caldeggiato da alcuni ricercatori del *team Deep Impact*, che ci hanno invitati a estendere nel tempo la nostra campagna osservativa per dare una panoramica più dettagliata possibile dell'apparizione anche nella fase post-impatto.

Le osservazioni

Gli osservatori e i relativi strumenti che hanno contribuito alla campagna osservativa sono elencati in tabella 1.

Nell'analisi sono stati utilizzati in particolare i dati ottenuti mediante CCD e filtri fotometrici R e I (Cousins) a banda larga [1] e mediante filtri a banda stretta (10 nm FWHM) centrati a 647-650 nm. Questi filtri isolano regioni dello spettro dove solitamente domina la luce riflessa dalle polveri. Il

filtro centrato a 647-650 nm in particolare copre una banda passante dove la contaminazione gassosa è del tutto trascurabile e permette quindi di effettuare osservazioni molto selettive. Questo permette anche una verifica diretta della bontà dei dati ottenuti in banda larga che più facilmente potrebbero essere contaminati da emissioni gassose.

Nel caso della cometa Tempel 1 non risultano contaminazioni sensibili nelle bande R e I, mentre nel V sembra esserci un certo grado di inquinamento, verosimilmente dovuto all'emissione del C2.

Per garantire l'omogeneità dei dati, come prima fonte sono state usate stelle di calibrazione tratte dal catalogo Hipparcos, scelte tra quelle non variabili e di indice di colore vicino a quello solare ($0.5 < (B-V) < 0.8$). Come fonte secondaria sono state utilizzate stelle del catalogo Tycho. Mediamente, valutando la dispersione dei dati e il confronto con i dati professionali, la precisione finale è stimata intorno al 10-20 per cento, sufficiente per gli scopi del programma.

L'aspetto mostrato dalla cometa è mutato sensibilmente nel corso dell'apparizione (figure 1, 2) ponendo in alcune fasi qualche problema a livello interpretativo. Si è infatti passati da un aspetto tipicamente stellare (chioma non risolta e probabile forte contributo del nucleo) a un aspetto diffuso ma costantemente asimmetrico. Non sono comunque rilevabili modificazioni morfologiche rilevanti, a eccezione degli affetti dell'impatto, comunque evidenti solo tramite un'appropriata elaborazione delle immagini.

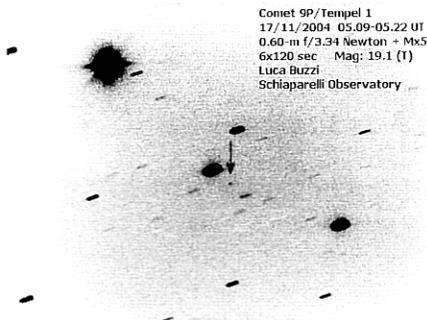


Figura 1. La prima immagine della cometa Tempel 1 ottenuta il 17 novembre 2004 da Luca Buzzi presso l'Osservatorio G. V. Schiaparelli (VA). L'aspetto è sostanzialmente stellare.

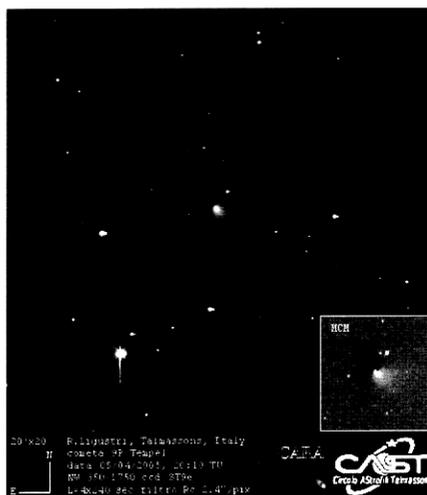


Figura 2. La cometa Tempel 1, ripresa da Rolando Ligustri (Osservatorio di Talmassons CAST) il 5 aprile 2005, mostra una chioma ben sviluppata e una forma visibilmente asimmetrica.



L'analisi dei dati

Come è noto, la quantità $Afrho$ pone come riferimento un modello teorico di chioma dove si ha una produzione uniforme di polveri alla superficie del nucleo e una espansione radiale a velocità costante (modello *stazionario*). Se queste condizioni fossero soddisfatte, il valore della quantità $Afrho$ sarebbe costante per qualunque apertura di misura utilizzata per effettuare la fotometria.

Nella realtà, una chioma cometaria mostra un comportamento assai diverso da questa chioma ideale: l'emissione di polveri, non solo avviene nell'emisfero diurno del nucleo, ma spesso in direzioni preferenziali, creando chiome asimmetriche, come nel caso della Tempel 1.

L'espansione è inoltre approssimativamente radiale e solo nelle zone interne della chioma, a causa dell'interazione con la pressione di radiazione solare. Infine viene a essere sovrapposto il contributo della coda.

Nonostante queste differenze, sorprendentemente avviene che comunque i risultati non siano molto dissimili da quanto previsto dal modello teorico.

Le linee guida del progetto CARA prevedono l'utilizzo della fotometria di apertura con finestre di misura di raggio (ρ) equivalente da 3000 a 50 000 km sulla cometa. In questo modo vengono misurate porzioni di chioma standard e il confronto dei dati risulta più efficace. Inoltre, analizzando l'andamento della quantità $Afrho$ in funzione di ρ , è possibile verificare quanto sia costante il valore con il variare della finestra di misura e quanto l'andamento osservato si avvicini al modello.

Nel caso della Tempel 1 si è inizialmente osservata una forte dipendenza del valore misurato dall'apertura di misura utilizzata per la fotometria, ma in seguito la dipendenza è diminuita e la quantità $Afrho$ è risultata sostanzialmente costante, ben entro l'errore sperimentale.

Per valutare meglio questa dipendenza è stato utilizzato per la fotometria un maggior numero di finestre di misura differenti, con particolare riguardo a finestre di raggio più piccolo.

Come è evidente dalle figure 3 e 4, dove vengono confrontati come esempio i dati ottenuti l'1 e il 2 aprile e l'1 e il 2 luglio, relativi a periodi nei quali si è manifestata una dipendenza massima e minima, è evidente una notevole dipendenza di $Afrho$ da ρ .

Questo ha posto dei problemi, sia per uniformare le misure, sia per spiegare il motivo di queste variazioni e verificare se vi fosse una causa di tipo fisico oppure no.

Per superare il primo problema è stato interpolato (o estrapolato a seconda dei casi) il valore $Afrho$ corrispondente a una finestra di misura di 5000 km di raggio sulla cometa. Considerata la scala immagine, questo valore spesso si colloca al limite della zona misurabile, dato che avvicinandoci alla risoluzione limite (imposta prevalentemente dal seeing) la misura viene alterata.

In questi casi nell'interpolazione-estrapolazione sono state considerate solo le misure nel tratto rettilineo del profilo della chioma interna, scartando quelle affette da sottocampionamento.

Tenuto conto che nella fase iniziale la cometa appariva quasi stellare è stato anche considerato il possibile contributo da parte del nucleo, per verificare se questo potesse avere un qualche peso nei nostri dati e nell'effetto di dipen-

denza sopra citato. Assumendo un valore indicativo medio per il raggio del nucleo pari a $R_n = 4$ km e un albedo $A = 0.01-0.02$ (vicino a quello osservato sulla cometa 19P e su asteroidi di tipo C) [2] in una finestra di 5000 km di raggio si ottiene un contributo massimo dell'ordine di 3-6 cm (per un angolo di fase zero).

Per buona parte dell'apparizione, quindi, l'apporto dato dal nucleo può essere ritenuto del tutto trascurabile e compreso nell'errore di misura.

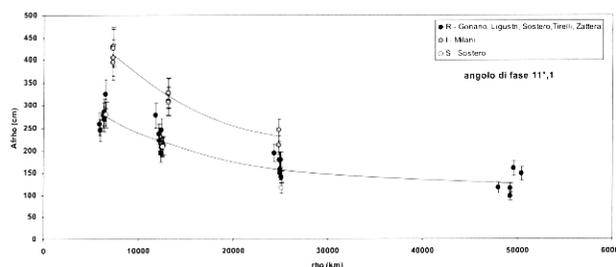


Figura 3. Profili della chioma che mostrano una variazione della quantità $Afrho$ tra l'1 e il 2 aprile 2005 e quindi una divergenza rispetto al modello teorico. Si nota la forte dipendenza del valore dalla misura della finestra utilizzata per la fotometria di apertura. Le dimensioni sono espresse in chilometri sulla cometa.

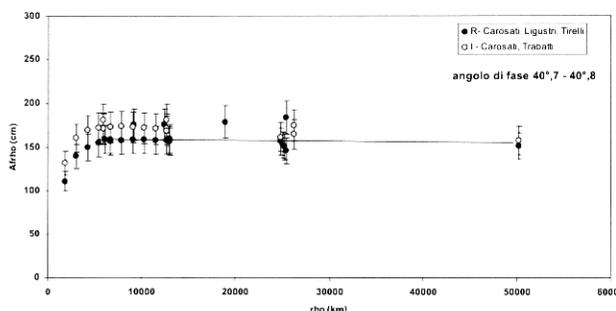


Figura 4. Profili della chioma che mostrano la costanza della quantità $Afrho$ tra l'1 e il 2 luglio 2005. Il valore risulta costante, quindi in accordo con il modello di chioma a espansione costante, tranne che per le finestre di misura più piccole a causa del sottocampionamento (valore vicino al limite di risoluzione del seeing).

Nel vagliare le possibili cause di variazione nel profilo della chioma è nato il sospetto che potesse trattarsi di un qualche effetto sistematico. Apparentemente, infatti, sembra esserci una relazione abbastanza definita con l'angolo di fase (vedi figure 5 e 6) anche se sono necessarie ulteriori indagini al riguardo per verificare se altre cause possano entrare in gioco.

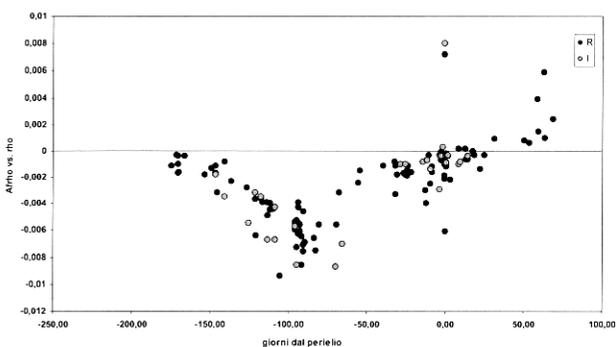


Figura 5. Variazione della pendenza media del profilo della chioma in funzione del tempo (giorni dal perielio). La massima deviazione coincide apparentemente con il minimo dell'angolo di fase (11 gradi) caduto tra fine marzo e inizio aprile.

Come si nota dalla dispersione dei punti, il valore della pendenza media presenta un margine di incertezza, dovuto prevalentemente alla difficoltà di misurare in modo rigoroso il valore di fondo cielo e alla presenza di stelle di campo non risolte sovrapposte alla chioma e che innalzano leggermente il valore medio.

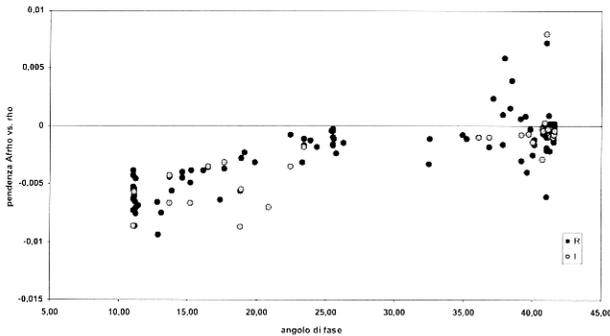


Figura 6. Pendenza media della chioma in funzione dell'angolo di fase. Si nota una possibile correlazione.

L'andamento della curva Afrho

Le misure finali, normalizzate per 5000 km, risultano complessivamente omogenee e il risultato è illustrato nelle figure 7 e 8.

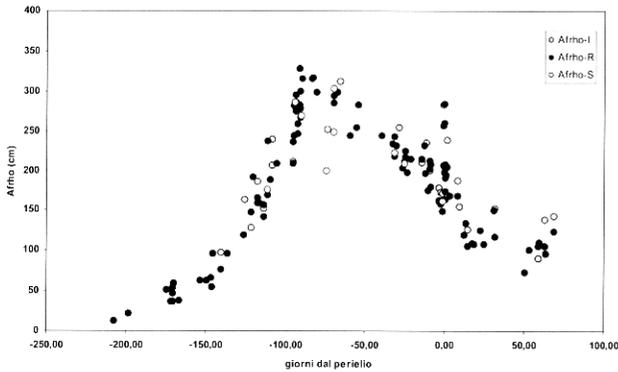


Figura 7. Curva Afrho normalizzata per una finestra di misura di 5000 km di raggio. A parte il breve picco dovuto all'impatto, l'andamento generale appare regolare. Il massimo cade 83 giorni prima del perielio.

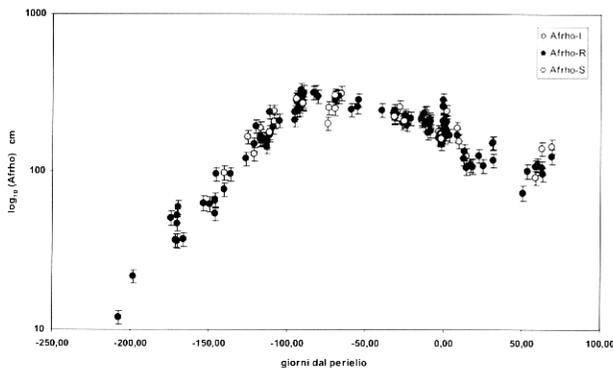


Figura 8. Curva Afrho normalizzata per una finestra di misura di 5000 km di raggio riportata su scala logaritmica e con una barra d'errore indicativa del 10% per visualizzare meglio l'andamento medio.

Si nota che, nella fase centrale, il valore mostra una costante salita (3.6 cm/giorno), raggiungendo un massimo circa 83 giorni prima del perielio (306 cm) per poi decrescere in

modo regolare (1.5 cm/giorno). Un andamento sostanzialmente identico è stato rilevato nelle precedenti apparizioni e risulta sorprendentemente sovrapponibile a quello attuale [4][5]. Si nota tuttavia una apparente lieve discordanza nel ramo ascendente della curva tra i dati precedenti e quelli della presente apparizione. Potrebbe comunque trattarsi di un effetto strumentale. Il massimo e la discesa sono perfettamente sovrapponibili.

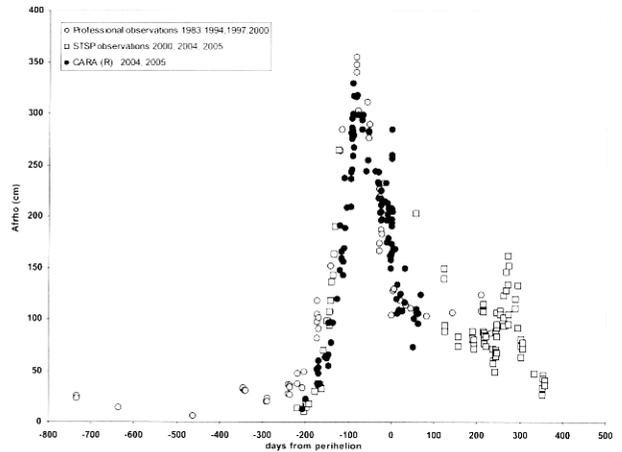


Figura 9. Confronto tra i dati ottenuti nel corso della presente campagna osservativa e i dati professionali e amatoriali raccolti in precedenza da Carey Lisse et al. del team di Deep Impact.

Va comunque considerato anche in questo caso che intorno a fine marzo, inizio aprile si è avuto il minimo dell'angolo di fase (circa 11 gradi). Assumendo che vi sia un effetto di fase analogo a quello osservato per altre comete [6] [7], si ricava che il massimo effettivo della curva potrebbe in realtà aver subito uno slittamento che lo porterebbe a cadere più vicino al perielio (indicativamente 40-50 giorni prima del perielio). Mancando al momento dati accurati relativi al presunto effetto di fase, non è possibile verificare di quanto eventualmente dovrebbe essere slittato l'istante del massimo.

Osservazioni relative alle precedenti apparizioni avevano suggerito sia l'occorrenza di *outburst*, sia la presenza di cosiddetti *getti* nella chioma (prevalentemente da osservazioni visuali). Tuttavia nella presente apparizione, nonostante lo stretto monitoraggio mediante CCD, non si è riscontrato nulla di particolare.

Finora, dai comunicati forniti da *Deep Impact*, sono noti un paio di eventi nei quali è stato osservato un improvviso aumento nella produzione di gas e polveri, ma l'entità appare piuttosto modesta non avendo in alcun modo alterato l'andamento della curva Afrho.

Complessivamente, e contrariamente alle aspettative, l'apparizione 2005 della Tempel 1 ha mostrato un comportamento molto regolare, smentendo la fama di imprevedibilità spesso accreditata alle comete. La situazione si è presentata dunque particolarmente favorevole per gli scopi della missione *Deep Impact* perché è stato molto più facile distinguere gli effetti dell'impatto dalla normale attività della cometa.

Il periodo dell'impatto del modulo sul nucleo

L'evento più atteso è stato naturalmente quello dell'incontro della sonda *Deep Impact* con il nucleo della cometa e

l'impatto del modulo sulla superficie. Le previsioni su ciò che avrebbe potuto accadere erano piuttosto vaghe, anche se alcune fonti immaginavano un possibile forte incremento di luminosità, tale da consentire di osservare la cometa anche mediante un binocolo, se non addirittura a occhio nudo. In realtà lo stesso A' Hearn, *leader* del *team Deep Impact* riportava che non si fosse in grado di effettuare previsioni accurate. Tutto poteva accadere: dal nulla a qualcosa di davvero spettacolare.

Poiché l'impatto è avvenuto il mattino del 4 luglio, l'evento non ha potuto essere osservato dall'Italia, se non la sera dello stesso giorno, ma è stato possibile vederne gli effetti via Internet nelle osservazioni professionali.

Per quanto riguarda i nostri dati, analizzare le conseguenze dell'impatto in termini di quantità A_{frho} ha permesso di verificare sostanzialmente due cose:

- 1) se e come l'equilibrio della chioma sia stato alterato (deviazione dal modello stazionario);
- 2) che incremento si è avuto nel valore medio e nel picco massimo, tenendo conto che nel periodo immediatamente successivo all'impatto la chioma non si trovava più in condizioni stazionarie, e quindi le variazioni della quantità A_{frho} non poteva fornire direttamente un dato ricollegabile alla quantità di materia emessa.

La figura 10 mostra i valori A_{frho} (relativi a un'apertura di misura di raggio 5000 km) in un intervallo di tempo di alcuni giorni intorno all'impatto. È evidente un breve picco, seguito da un ritorno alla normalità che sembra essersi completato nell'arco di circa un paio di giorni.

Le variazioni nel profilo della chioma (figure 11, 12, 13), permettono di evidenziare più in dettaglio i cambiamenti avvenuti con il passare del tempo, in corrispondenza all'espansione dell'ondata prodotta dall'impatto.

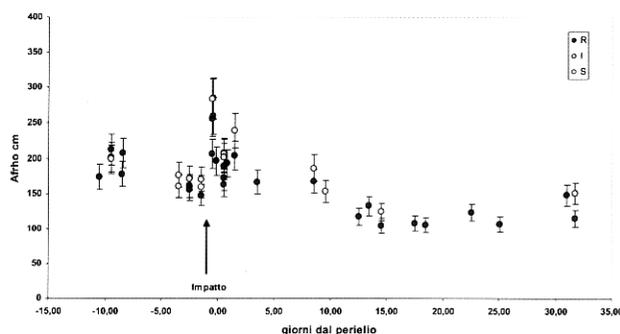


Figura 10. La misura della quantità A_{frho} mostra un breve e temporaneo picco immediatamente successivo all'impatto. La variazione appare contenuta (circa il 30% di aumento).

Stimando la posizione del massimo della deformazione del profilo fotometrico della chioma (teoricamente orizzontale) si ricava che questo si è spostato all'incirca con una velocità di circa 0.2 km/s. Considerando una chioma estesa indicativamente per un raggio pari a 50 000 km, si deduce che l'ondata prodotta dall'impatto debba averla attraversata completamente in un tempo scala di circa 3 giorni. Questo fatto, assieme alla regolarità dell'andamento medio durante l'apparizione, supporta l'ipotesi che l'impatto non abbia prodotto modificazioni sensibili sulla superf-

cie del nucleo. Infatti, l'andamento prima e dopo l'impatto, come si osserva nella figura 9, appare perfettamente sovrapponibile ai dati delle precedenti apparizioni. Viene quindi fortemente messo in dubbio il modello classico di nucleo formulato da Whipple negli anni Cinquanta. Se infatti il nucleo fosse stato costituito da una parte interna ricca di ghiaccio d'acqua ricoperta da una crosta inerte, si sarebbe dovuta produrre un'area attiva (uno dei possibili effetti attesi come esito dell'esperimento). I dati raccolti nel presente lavoro forniscono un'ulteriore conferma a quanto trovato del *team* di *Deep Impact* che vede invece un modello di nucleo di composizione essenzialmente omogenea, molto poroso e dove le polveri sono il componente principale [8]. Il ghiaccio risulta verosimilmente intrappolato nelle polveri e non viceversa.

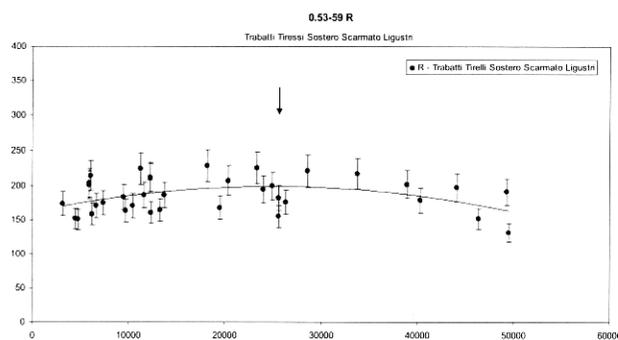
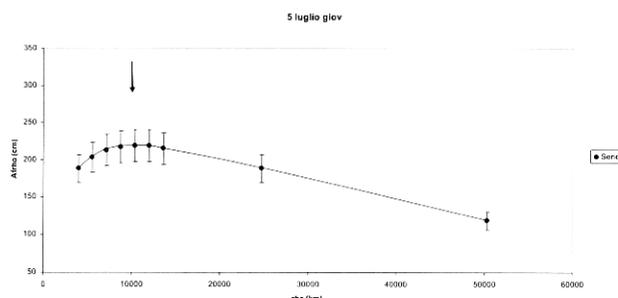
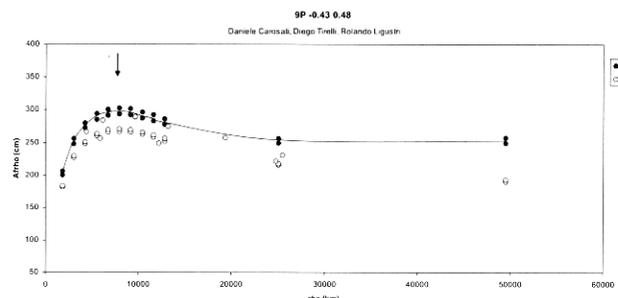


Figure 11, 12, 13. L'alterazione del profilo medio della chioma prodotta dall'ondata di polveri in espansione è ben visibile nelle riprese successive all'impatto.

La ricerca di una tale verifica, basata su un'attenta sorveglianza della cometa dopo l'impatto, ci era stata raccomandata in particolare da Carey Lisse, del *team Deep Impact*. L'elaborazione delle immagini ottenute ha permesso anche di evidenziare la nube di polveri prodotta nell'impatto, particolarmente evidente la sera del 4 luglio, ma ancora osservabile la sera seguente. Particolarmente efficaci le riprese effettuate con gli strumenti di focale e diametro maggiori che hanno prodotto immagini a più alta risoluzione (figure 15 e 16).

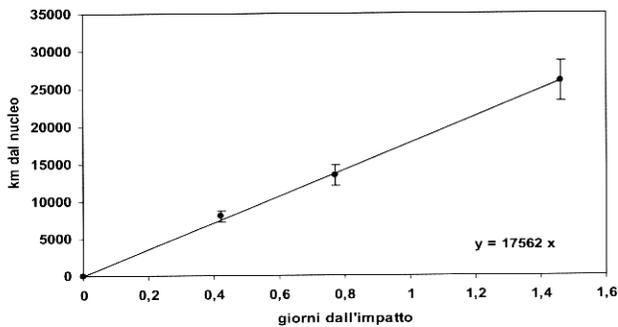


Figura 14. La posizione stimata del massimo delle figure 11, 12, 13 mostra uno spostamento regolare pari a circa 0.2 km/s. Questo significa che l'ondata prodotta dall'impatto ha attraversato la chioma in un tempo scala di circa 3 giorni.

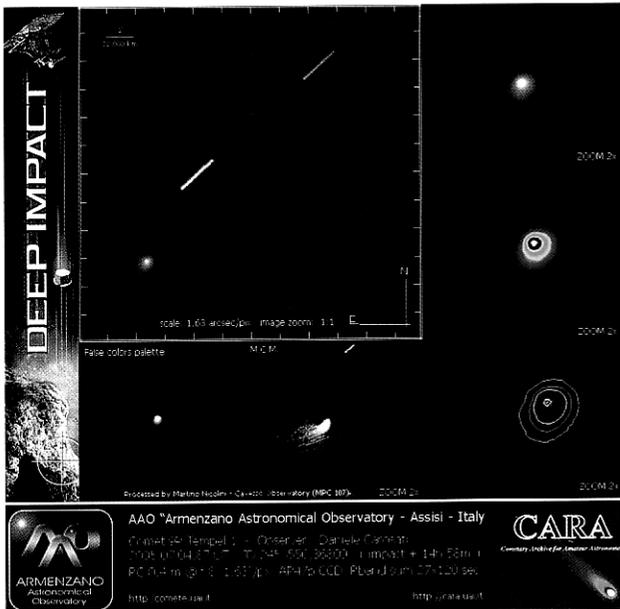


Figura 15. Un'immagine a elevata risoluzione successiva all'impatto realizzata da Daniele Carosati presso l'Osservatorio di Armenzano mostra l'aspetto asimmetrico assunto dalla chioma a causa del materiale emesso dall'impatto del modulo sulla superficie del nucleo.

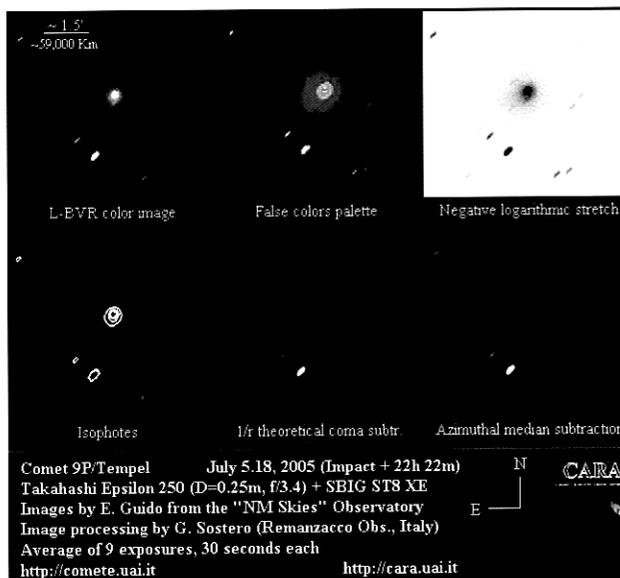


Figura 16. Immagine ripresa il 5 luglio in remoto da E. Guido tramite il New Mexico Skyes Observatory e analizzata da Giovanni Sostero. Da notare l'evoluzione morfologica rispetto alla ripresa precedente.

Una ricca panoramica delle immagini raccolte nel corso dell'apparizione è reperibile nel sito della Sezione Comete

<http://comete.uai.it>, curato da Rolando Ligustri.

Conclusioni

La campagna osservativa sulla cometa 9P Tempel 1 realizzata nell'ambito del progetto CARA ha permesso di ottenere un dettagliato monitoraggio nel corso dell'apparizione. Il comportamento generale si è mostrato perfettamente sovrapponibile a quello dei precedenti passaggi, mostrando come questa cometa si ripresenti con caratteristiche sorprendentemente costanti. Il massimo nel valore della quantità $Afrho$ è stato raggiunto circa 80 giorni prima del passaggio al perielio. Non sono stati osservati eventi di rilievo (come *outburst* o variazioni importanti nella morfologia della chioma, tranne che in concomitanza dell'impatto del modulo sulla superficie). Nella fase dell'impatto si è osservato un breve e temporaneo aumento del valore $Afrho$ e una conseguente modesta variazione nel profilo della chioma. L'effetto prodotto dall'evento si è tuttavia esaurito completamente in un tempo scala dell'ordine di tre giorni, tempo necessario all'ondata in espansione per attraversare la chioma. Interpretando l'alterazione nel profilo fotometrico medio della chioma come onda di polveri in espansione si ricava una velocità prossima a 0.2 km/s. Il fatto che l'impatto non abbia alterato in modo permanente l'attività della cometa ha fornito un'ulteriore indicazione che il nucleo non possa essere descritto in modo efficace sulla base del modello a *palla di neve sporca* formulato da Fred Whipple circa 50 anni fa. Quanto sta emergendo dai risultati della missione *Deep Impact* indica infatti che il nucleo sia più simile a una *agglomerato di polvere sporca ghiacciata* con una costituzione molto più omogenea di quanto previsto. D'altra parte erano già emersi dubbi in questo senso, come sostenuto da recenti modelli di nucleo alternativi a quello di Whipple (vedi Rodionov et al [9]).

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato possibile grazie all'impegno degli osservatori (tabella 1) che hanno sostenuto e contribuito al progetto CARA. Un particolare ringraziamento va a quanti nel corso degli incontri tra osservatori e nelle successive discussioni hanno partecipato attivamente per migliorare e perfezionare le tecniche osservative e di riduzione dati. Un ringraziamento va inoltre ai professionisti che hanno sostenuto e incoraggiato questo progetto, tra i quali Marco Fulle, Gian Paolo Tozzi, Laurent Jorda, Gyula Zsabo' oltre al *team* di *Deep Impact* Michael A' Hearn, Karen Meech, Stephanie McLaughlin, Elizabeth Warner, Carey Lisse.

Bibliografia

- [1] Bessell M. S., *PASP*, **102**, 1181-1199 (1990)
- [2] Soderblom A. et al., *Science*, **296**, 1087-1091 (2002)
- [3] A'Hearn M. F. et al., *Astronomical Journal*, **89**, 579-591 (1984)
- [4] Lisse C.M. et al., *Space Science Reviews*, (2005, in press).
- [5] McLaughlin S.A., McFadden L. A. and Emerson G., <http://deepimpact.umd.edu/stsp/results/results.shtml>
- [6] Meech K. J., Jewitt D.C., *A&A*, **187**, 585 (1987)
- [7] Milani G., *Astronomia UAI*, **2**, 63 (2003)
- [8] Kerr R.A., *Science*, 309,1667 (2005)
- [9] Roodionov A. V. et al., *Planetary and Space Science*, **50**, 983-1024 (2002)



Tabella 1. Elenco degli osservatori che hanno contribuito alla presente ricerca, loro strumenti e filtri usati.

Aletti A. Buzzi L.	60 cm Newton f/4.64	B,V,R,I	Osservatorio Astronomico "G.V.Schiaparelli" (Varese)
Bryssinck E.	28 cm f/6.3 Schmidt-Cassegrain	V	Kruikebe, Belgio'
Buso V. Mazalan V.	35 cm f/3.3 Schmidt-Cassegrain	R,I	Observatorio Colegio Cristo Rei, Rosario, Argentina
Carosati D.	40 cm f/8 Ritchey-Chretien	V,R,I	Osservatorio Armenzano (PG)
Focardi L.	12.5 cm Schmidt-Cassegrain	unfiltered	Firenze
Fratev F.	20 cm f/10 Schmidt-Cassegrain	R,I	Milano
Guido E.	25 cm f/3.5	V,R,I	New Mexico Skyes Observatory U.S.A.
Higgins D.	35 cm f10 Schmidt-Cassegrain	R,I	Hunters Hills Obs., Canberra, Australia
Ligustri R., Romanello F., Da Rio D.	35 cm f/5 Newton	B,V,R 647 nm	Osservatorio Talmassons CAST (UD)
Mikuz H.	60 cm f/3.3 riflettore - fuoco primario	R	Osservatorio Crni Vrh, Slovenia
Milani G.	20 cm f/4 Newton	R,I	Padova
Nicolini M., Facchini M.	40 cm f/5 Newton	R, 650 nm	Osservatorio Cavezzo (MO)
Scarmato T.	25 cm f/5 Newton	R	Osservatorio S. Costantino di Briatico (VV)
Sostero G., Gonano M., Gonano V., Lepardo A. e Santini V.	25 cm Schmidt-Cassegrain f/5.2 Newton 0.45 m f/4.5, Newton 0.25 m f/4, Maksutov 0.15 m f/6.	B,V,R,I 647 nm	Osservatorio Remanzacco - AFAM (UD)
Tirelli D.	25 cm f/6 Newton	R	Sossano (VI)
Trabatti R.	28 cm f/10 Schmidt-Cassegrain	R, I, 647	Stazione Astronomica. Descartes - Chignolo Po' (PV)
Zattera F.	25 cm F/6.3	B, V	Malo (VI)