Zdenek Sekanina Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology

Che cos'è accaduto alla cometa C/2002 O4 (Hönig)?

Abstract

The evolution of comet C/2002 04 (Hönig) is investigated from its discovery to its disappearance. and the issue of its fate is addressed. It is suggested that the comet was discovered while in outburst and that a significant fraction of its initial mass had already been lost by the time this episode terminated before mid-August 2002. The outburst, which apparently engulfed the entire subkilometer-sized nucleus, began 2-3 days before discovery, extending over a period of more than 10 days and perhaps as long as 3-4 weeks, with a peak dust-production rate of $\sim 10^7$ g/s, much higher than that of Halley's comet at the same heliocentric distance. The total mass of comet C/2002 O4 expended during the event is estimated at 1-2×10¹³ grams, a significant fraction of its nucleus mass. The tail orientation pattern suggests that the activity-driven dust production was confined largely to the period of time from ~90 to 50 days before perihelion (early July to mid-August), so the comet may have been active before the outburst. The event set off a process of runaway erosion of the remaining mass of the nucleus, leading to the comet's complete disintegration into dust and minor fragments near perihelion, as indicated by the sudden fading, the loss of nucleus condensation, and the sizable nongravitational perturbations of the orbital motion. If, contrary to the evidence, the nucleus had survived essentially intact and had become dormant, the comet's motion would have been much more compatible with the gravitational law. A model of the light curve suggests that the latent energy of erosion for the nucleus of comet C/2002 04 was only 10 000 cal/mole, lower than the sublimation heat of water ice. Thus, the comet's disintegration was nearly spontaneous.

Paper appeared on International Comet Quarterly, 24, 223-236 (2002) and reproduced here with the permissions of both the Author and the Editor, Daniel Green. Translation by Carlo Vinante.

1. Introduzione

Alla fine di settembre 2002 diversi siti web cometari riportarono che la cometa C/2002 O4 (Hönig) stava indebolendosi rapidamente, pochi giorni prima di raggiungere il perielio, l'1.98 ottobre ET (Tempo delle Effemeridi) a una distanza eliocentrica r = 0.776 UA (Unità Astronomica, la distanza media Terra-Sole). Scoperta il 22 luglio quando si trovava 1.51 UA dal Sole, l'oggetto era passato entro 10° dal polo nord celeste a metà agosto, ma nulla di insolito era stato notato su di esso durante i primi due mesi di osservazione.

Uno degli allarmi, lanciati il 30 settembre da un sito web tedesco (www.fg-kometen.de), annunciava che la cometa

C/2002 O4 era divenuta molto diffusa mostrando segni di disintegrazione in immagini come quella ripresa da M. Jäger il 29.78 settembre UT. Infatti, tutte le immagini prese nel periodo di tempo che va dal 28 settembre al 1 ottobre mostravano drammaticamente la progressiva attenuazione della condensazione del nucleo nell'arco di 72 ore. La successiva immagine nota, ripresa il 10 ottobre da K. Kadota (astro.web.sh.cwidc.net/ageo/comet/2002o4), mostrava solo una debole coda rettilinea senza tracce di condensazione nucleare (cfr. Green 2002). La completa assenza della testa cometaria è stata successivamente confermata in ulteriori immagini riprese l'11, il 16 ottobre e il 6 novembre da Y. Ohshima (hi-ho.ne.jp/hirohisa-sato/ Index/c2002o4.htm) e il 27 ottobre dallo stesso Kadota. Prima di questa indagine la natura e l'evoluzione temporale del processo di scomparsa della cometa C/2002 O4 non era nota, quindi non era ancora chiaro di per sé se la cometa

Viene mostrato qui di seguito che le immagini pubblicate, la curva di luce, il moto orbitale, e altre informazioni disponibili, offrono una straordinaria possibilità di comprendere a fondo la storia della cometa C/2002 O4 e ci permettono di rispondere in dettaglio alla domanda su che cosa è veramente successo a questo oggetto.

si era disintegrata o se era solo temporaneamente divenuta

2. L'aspetto della coda e l'evoluzione

dormiente.

Nelle immagini prese a fine settembre e in ottobre la morfologia della coda della cometa C/2002 O4 mostra un notevole grado di somiglianza con le code di altre comete durante il processo della loro sparizione. Rilevanti esempi sono la C/1999 S4 (LINEAR), C/1996 Q1 (Tabur) e C/1925 X1 (Ensor). Le immagini delle prime due possono essere viste, per esempio, presso il sito web dell'Osservatorio di Črni Vrh (fiz.uni-lj.si/astro/comets), mentre due fotografie della cometa C/1925 X1 sono state pubblicate da Schorr (1926). Le comete sono state studiate rispettivamente da Weaver et al. (2001), da Fulle et al. (1998b) e da Sekanina (1984). Gli autori conclusero indipendentemente che ciascuna di queste comete si è dissipata, la maggiore evidenza è risultata per la cometa C/1999 S4 grazie alle osservazioni effettuate con l'Hubble Space Telescope (HST) e l'European Southern Observatory Very Large Telescope (VLT).

Queste comete, e altre simili, hanno un tratto caratteristico in comune, che è la rapida caduta dell'attività avvenuta prima del perielio. Le distanze del perielio erano 0.323 UA per la C/1925 X1, 0.840 UA per la C/1996 O1 e 0.765 UA (quasi identica a quella della C/2002 O4) per la cometa 1999 S4. È stato dimostrato che le code sopravvissute di queste comete erano composte da polveri, dominate da particelle relativamente grandi (dimensioni > circa 100 μm).

2.1 Natura della coda

Che tipo di coda ha presentato la C/2002 O4? Le prime immagini, riprese a fine luglio e inizio agosto, non mostrarono una cospicua coda. La cometa mostrò una chioma diffusa di pochi primi d'arco di diametro, distintamente allungata verso sud-ovest. Dalla sensibilità spettrale del rivelatori CCD utilizzati si sospetta che le tracce di coda osservate fossero probabilmente composte da polveri, ma corte emissioni di plasma possono avere anche contribuito all'aspetto osservato.

Con il passare del tempo, e mentre la Terra stava gradualmente avvicinandosi al piano orbitale della cometa, la coda si è allungata ed è divenuta più cospicua. Questo effetto sembra dovuto a un rinforzo della profondità ottica provocato dalla più marcata visione di taglio che è diagnostica della natura polverosa della coda e non è mai associata a code di ioni.

Un'immagine è stata ripresa da V. Gonano, L. Monzo, L. Maestrutti (uai.it/sez com/2002o4), poche ore prima del passaggio della Terra sul piano orbitale della cometa, con una camera Backer-Schmidt, rivelatore CCD e filtro infrarosso. L'aspetto della coda appariva lo stesso che in altre immagini riprese senza filtri all'incirca nello stesso momento. Un'osservazione binoculare fatta quasi simultaneamente da M. Mayer (cfa-www.harvard.edu/ icq/CometMags.html) dimostra che la coda appariva visualmente molto più lunga che nelle immagini, forse a causa della perdita di contrasto nella riproduzione. È interessante notare che la coda ha continuato a proiettarsi come una struttura abbastanza sottile per l'intero mese successivo al transito della Terra sul piano orbitale, ma io non ho notizie di immagini nelle quali possa essere rintracciata la tipica struttura filamentosa di una coda di plasma. L'immagine nella quale la coda assomiglia più da vicino a una struttura di ioni è quella ottenuta da M. Jäger (fg-kometen.de/pix/pc02o4e.htm) il 21 agosto. Iniziando dalla seconda settimana si settembre la coda cominciò finalmente ad allargarsi, acquistando le proporzioni caratteristiche di una formazione di polveri.

Riassumendo, è probabilmente corretto ritenere che la coda fosse composta completamente, o quasi completamente, di polveri in tutti gli istanti. Il suo aspetto piuttosto peculiare, derivò probabilmente da un effetto combinato della geometria (specialmente la vicinanza al piano orbitale) e della distribuzione temporale della produzione di polveri.

2.2 Orientazione della coda

Poiché la storia della produzione di polveri (compresa la sua fine) può essere ricavata dall'orientamento della coda di polvere, esaminare le proprietà più rilevanti della sua coda costituisce una priorità nell'indagare il destino subìto dalla cometa C/2002 O4. A questo proposito ho calcolato un'effemeride della produzione di polveri, presentata qui come tabella 1 (in fondo all'articolo). Le prime 4 colonne sono auto-esplicative. La quinta colonna elenca la latitudine cometocentrica della Terra, cioè la sua deviazione angolare dal piano orbitale cometario, osservata dall'oggetto, un parametro molto critico. Poiché l'asse di una coda di polveri giace sempre nel piano orbitale cometario (o molto vicino a esso), la coda è proiettata di profilo, se osservata

dalla Terra, nell'istante del transito del nostro pianeta attraverso il piano orbitale; non è possibile allora ottenere nessuna informazione sull'orientamento spaziale della coda. Generalmente non è possibile estrarre dati utili da immagini riprese a latitudini cometocentriche inferiori in valore assoluto a circa 10°. Nel caso della cometa C/2002 O4 questo periodo sfavorevole si estese per circa due settimane, centrate sul 14 agosto, il momento del transito della Terra sul piano orbitale.

La sesta e la settima colonna di tabella 1 mostrano gli angoli di posizione (contati da nord verso est) rispettivamente del prolungamento del raggio vettore RV (cioè la direzione antisolare) e il vettore opposto al vettore velocità V (cioè la direzione dell'orbita dietro la cometa), entrambi in proiezione sul piano del cielo. Questi due vettori determinano i margini del settore entro i quali l'intera coda di polveri deve essere contenuta. L'angolo di posizione del prolungamento del raggio vettore approssima la direzione nella quale si collocano le polveri rilasciate poco tempo prima dell'istante di osservazione, mentre l'angolo di posizione del vettore opposto al vettore della velocità orbitale definisce la direzione nella quale si concentrano le polveri emesse molto in precedenza.

Al di fuori del periodo di configurazione sfavorevole tra Terra e cometa, le epoche di produzione significativa di polveri possono essere stimate misurando l'orientamento della coda di polveri e confrontandole con le effemeridi di tabella 1.

Mente l'accuratezza di questo approccio è molto più bassa rispetto a quella di un'analisi completa della coda di polveri, analisi che richiede molto tempo, questo approccio fornisce significative informazioni sulla storia della produzione di polveri dell'oggetto. Le particelle che si assume siano state emesse dalla cometa C/2002 O4 tra 100 e 20 giorni prima del perielio (cioè tra il 24 giugno e il 12 settembre 2002), sono previste allinearsi nella coda lungo linee rette i cui angoli di posizione (P.A.) sono elencati nelle rispettive colonne della parte destra della tabella 1, assieme con le lunghezze previste L (in minuti d'arco) riferite a una popolazione di grani soggetti alla pressione di radiazione solare che non eccedono 0.002 volte la accelerazione gravitazionale solare (o all'incirca 0.0012 cm/s² a 1 UA dal Sole). I diametri di queste particelle di polveri sono dipendenti dalla densità, ma superano 0.11 cm a una densità di 0.5 g/cm³ e 0.28 cm a 0.2 g/cm³.

2.3 Vincoli alla produzione di polvere

Una rapida scorsa degli orientamenti della coda nelle immagini di fine settembre, e il confronto di questi con gli angoli di posizione in tabella 1, ha rivelato immediatamente l'importante allontanamento della coda dalla direzione antisolare.

Infatti, la cometa stava allora esattamente a nord del Sole ma l'intera coda, comprendendo i suoi margini, stava puntando chiaramente verso nord-est, indicando l'assenza di emissione di polveri per almeno un certo tempo prima del perielio. Ancora più ovvie deviazioni della coda dalla direzione antisolare erano state notate nelle immagini di ottobre, nelle quali la coda era diretta verso nord-nord-est, mentre una coda composta da emissioni di polveri

rilasciate in vicinanza del perielio, avrebbero dovuto puntare verso nord-ovest. È quindi risultato ovvio che la produzione di polveri della cometa non ha iniziato a diminuire significativamente a fine o a metà settembre, ma molto, molto prima.

Per ottenere migliori stime dei tempi dell'attività emissiva delle polveri da parte della cometa C/2002 O4, i dati sull'orientamento della coda sono stati raccolti sia come riportati in letteratura sia come misurati direttamente dall'autore (Z. S.) su un certo numero di immagini selezionate. Le misure si sono potute fare solo su immagini con l'identificazione dei punti cardinali o con tracce stellari dalle cui posizioni potesse essere stabilito l'orientamento. Una lista di queste immagini è presentata in tabella 2 (fine articolo). Le prime cinque colonne contengono le stesse quantità della tabella 1, mentre le rimanenti sei mostrano, rispettivamente, l'angolo di posizione e la lunghezza della coda misurate o riportate, il tempo di ejezione ricavato e l'accelerazione di picco della pressione di radiazione solare (in unità di accelerazione gravitazionale solare) alla quale sono state soggette le polveri della coda, l'osservatore/i e la fonte delle informazioni.

I risultati di questo esercizio sono sorprendenti: tutte e 23 le determinazioni dell'istante effettivo di emissione di polveri mostrano in modo consistente che esso è avvenuto più di 50 giorni prima del perielio, e 17 di queste determinazioni, che sono considerate ragionevolmente accurate, forniscono una media di 70 ± 9 giorni prima del perielio. Quindi l'evidenza basata sui dati relativi all'orientamento della coda suggerisce che la cometa C/2002 O4 stava producendo polvere principalmente nel periodo di tempo tra 90 e 50 giorni prima del perielio (tra inizio luglio fino a metà agosto 2002) quando la sua distanza eliocentrica era compresa all'incirca tra 1.76 e 1.21 UA. Il momento della scoperta, 72 giorni prima del perielio, si colloca a metà di questo periodo di attività. I risultati, soprattutto quelli ricavati dalle immagini del periodo settembre-ottobre, indicano quindi che la coda era costituita principalmente di grani pesanti, soggetti a un'accelerazione di radiazione solo di pochi millesimi dell'accelerazione gravitazionale solare (cfr. paragrafo 4).

Alla luce di questi sorprendenti scoperte riguardanti il profilo temporale della produzione di polveri, è interessante studiare l'andamento della luminosità della cometa, analisi che costituisce il prossimo oggetto di questo lavoro.

3. La curva di luce

È una fortuna che, grazie alla traiettoria geocentrica che ha reso l'oggetto circumpolare in gran parte dell'Europa e del Nord America in agosto e nella prima metà di settembre, la cometa sia stata osservata assiduamente da molti astrofili, e che sia stato possibile costruire una curva di luce molto affidabile da un gran numero di stime di magnitudine.

La mia fonte primaria è stato il sito web di *International Comet Quarterly* (cfa-www.harvard.edu/icq/CometMags.html) arricchita con numerosi dati dalla *Jet Propulsion Laboratory's "Comet Observation Home Page*", mantenuta da Charles Morris (encke.jpl.nasa.gov/RecentObs.html). L'analisi ha seguito una procedura standard. Le stime di magnitudine visuali e un numero limitato

di magnitudini CCD sono state standardizzate, per quanto possibile, applicando correzioni per effetti strumentali e personali, e poi normalizzate a una distanza geocentrica unitaria (Δ) per mezzo di una legge di potenza inversa.

La procedura di standardizzazione della magnitudine si è basato sul confronto visivo di curve di luce sovrapposte nel tempo, basate su osservazioni fatte da osservatori singoli (separatamente per ciascuno strumento, quando ne fosse stato usato più di uno) e minimizzando la dispersione reciproca facendole slittare verso l'alto o verso il basso, secondo la necessità, lungo l'asse delle magnitudini. Se due curve di luce di differenti osservatori o strumenti non si sovrapponevano l'una con l'altra nel tempo, è stato fatto uno sforzo di utilizzare ulteriori curve di luce di altri per coprire i vuoti. In questo modo di prova-e-correggi, alla fine sono state ottenute correzioni costanti per tutte le serie di dati ragionevolmente uniformi che sono state successivamente normalizzate a un unico sistema fotometrico, per il quale ho adottato la più luminosa tra le curva di luce personali. Ciascuna serie di dati per la quale non è stato possibile determinare un'appropriata correzione è stata scartata. Magnitudini isolate - una o due per osservatore e per strumento -, sono state ignorate, eccettuata la stima di magnitudine alla scoperta che è stata utilizzata sebbene non corretta per effetti strumentali e personali. Quindi, come d'uso, la magnitudine normalizzata $H_{\Lambda}(t, r)$ è correlata alla magnitudine apparente standardizzata H(t, r, Δ) mediante la relazione

$$H_{\Delta}(t, r) = H(t, r, \Delta) - 5 \log_{10} \Delta, \tag{1}$$

dove Δ è in UA.

Complessivamente sono state utilizzate 146 magnitudini provenienti da 19 osservatori, coprendo il periodo dal 22 luglio all'1 ottobre. La stima non corretta di magnitudine all'epoca della scoperta pare accordarsi molto bene con l'andamento della luminosità nel periodo iniziale immediatamente successivo alla scoperta. Stime grossolane della luminosità della coda residua effettuate dopo il perielio non sono state incluse in questa analisi. La luminosità è stata riportata in funzione del tempo e

La luminosità è stata riportata in funzione del tempo e della distanza eliocentrica alla ricerca della descrizione più completa possibile della curva di luce.

3.1 Variazioni temporali

Per interpolare la curva di luce in funzione del tempo sono state effettuate alcune prove con vari polinomi di *t-T*, dove *T* rappresenta l'istante del passaggio al perielio. Un'interpolazione molto soddisfacente è stata raggiunta usando il seguente polinomio del quarto grado:

$$H_{\Lambda}(t) = H + a(t-T) + b(t-T)^2 + c(t-T)^3 + d(t-T)^4,$$
 (2)

con un residuo medio di ± 0.15 magnitudini, dove $H = 0.53 \pm 0.12$, $a = 0.186 \pm 0.017$, $b = 0.00753 \pm 0.00092$, $c = 0.000144 \pm 0.000019$, e $d = 0.00000115 \pm 0.00000013$. La figura 1 mostra che questo polinomio rappresenta molto bene le osservazioni a t < T - 20 giorni (cioè prima del 12 settembre e a distanze eliocentriche r superiori a 0.86 UA). Il picco di luminosità è stato raggiunto nominalmente a



 $t_{\rm peak} = T - 29.24$ giorni, il 2 settembre, con $H_{\Lambda}(t_{\rm peak}) = 7.77$. A causa del tempo di vita finito delle emissioni di polvere nella nube che circonda il nucleo, la produzione di polveri della cometa deve avere avuto un massimo molto prima dell'inizio di settembre, una condizione che è consistente con le conclusioni dei paragrafi 2.3 e 5.

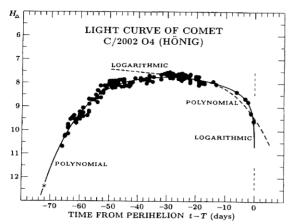


Figura 1. La magnitudine H_{Δ} della cometa C/2002 O4, normalizzata a 1 UA dalla terra, diagrammata in funzione del tempo contato dal passaggio al perielio, T=2002 ottobre 1.98 ET. I dischetti sono 145 dati basati sulle magnitudini visuali e CCD che sono stati raccolti, standardizzati al meglio correggendo per gli effetti personali e strumentali. L'asterisco è la magnitudine non corretta all'epoca della scoperta. Le due curve sono, rispettivamente, una polinomiale del quarto grado descritta dall'equazione (2) e chiamata POLYNO-MIAL, e una semplice legge di erosione descritta dall'equazione (5) e chiamata LOGARITHMIC. La polinomiale si adatta estremamente bene alla curva di luce osservata per tutti i tempi minori di T-20 giorni, mentre la legge logaritmica si adatta meglio per tempi compresi fra T-20 giorni e T. Al tempo T-20 giorni entrambe le funzioni danno la stessa magnitudine e la stessa pendenza.

Vicino al perielio, il polinomio non interpola l'improvviso straordinario crollo nella curva di luce. In questo intervallo di 20 giorni una migliore rappresentazione è offerta da una semplice legge basata sull'assunzione che la cometa si stesse davvero disintegrando completamente. In prima approssimazione, ho supposto che (i) il nucleo si stesse erodendo rapidamente a velocità costante \dot{R} nel tempo e che (ii) la luminosità normalizzata $\Im_{\Lambda}(t)$ sia variata con qualche legge esponenziale (esponente v) del raggio del nucleo R(t) che andava contraendosi.

$$\mathfrak{I}_{\Lambda}(t) \propto [R(t)]^{r} \propto [R_{0} - \dot{R} (t - t_{0})]^{r}, \tag{3}$$

dove $R_0 = R(t_0)$ rappresenta il raggio iniziale del nucleo al tempo t_0 , prima che iniziasse il processo di erosione. Introducendo l'istante di completo consumo $t_{\rm fin}$, quando $R(t_{\rm fin}) = 0$, si ottiene $R(t) = \dot{R} \ (t_{\rm fin} - t)$ e quindi

$$H_{\Delta}(t) = H_1 - 2.5 \ v \log_{10}(t_{\text{fin}} - t)$$
, (4)

dove H_1 è la magnitudine normalizzata un giorno prima che il nucleo fosse completamente eroso. Assumendo che $t_{\text{fin}} = T$, io ottengo un'eccellente interpolazione della curva nel periodo T-20 giorni $\leq t \leq T$ (dal 2 settembre fino all'1 ottobre, $r \leq 0.86$ UA) usando la formula:

$$H_{\Delta}(t) = H - A \log_{10}|t - T|,$$
 (5)

dove $H=9.22\pm0.08$ e $A=1.050\pm0.073$. Questa legge è rappresentata in figura 1 dalla curva denominata LOGARITHMIC; a t=T-20 giorni, essa prevede la stessa magnitudine ($H_{\Delta}=7.85$) e la stessa velocità di affievolimento ($\dot{H}_{\Delta}=+0.02$ mag/giorno) della polinomiale (equazione 2). Quindi ci si aspetterebbe che, se l'erosione fisica del nucleo fosse davvero la causa del precipitoso crollo nella luminosità della cometa poco prima del perielio, la velocità istantanea di affievolimento dovrebbe variare proporzionalmente all'area della superficie, nel qual caso v=2 e la pendenza dell'equazione (5) dovrebbe essere 5 anziché 1.05. Tuttavia il tempo di vita finito dei prodotti dell'erosione che ristagnano nelle immediate vicinanze del nucleo in contrazione dovrebbe far apparire molto più lenta la velocità di indebolimento.

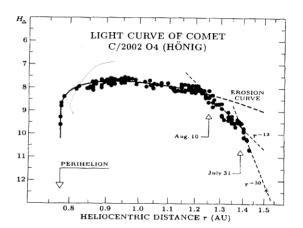


Figura 2. La magnitudine $H_s(r)$ della cometa C/2002 O4, normalizzata a 1 UA dalla Terra, in funzione della distanza dal Sole, r. I dischetti sono 145 punti standardizzati, come descritto nella didascalia della figura 1, l'asterisco è la magnitudine riportata al momento della scoperta. Le due curve a tratteggio corto mostrano la variazione di luminosità che sono consistenti con le leggi esponenziali r⁻³⁰ e r⁻¹², e rappresentano bene le magnitudini osservate rispettivamente a r > 1.39 UA (prima del luglio 31.0 TU) e 1.39 > r > 1.25 UA. I punti a r < 1.25 UA (dopo l'agosto 10.0 UT) sono rappresentate meglio da una legge chiamata EROSION CURVE e derivata da un modello di erosione, che è stato sviluppato di recente per studiare la curva di luce delle comete SOHO che sfiorano il Sole. Per il nucleo della cometa C/2002 O4 questo modello implica un'energia latente di erosione di sole 10 000 cal/mole, che è inferiore al calore di sublimazione del ghiaccio d'acqua.

3.2 Variazioni con la distanza eliocentrica

L'evoluzione della curva di luce in funzione della distanza eliocentrica può essere suddivisa in tre fasi successive (figura 2). Nei primi nove giorni successivi alla scoperta (22-30 luglio), la cometa è stata vista aumentare proporzionalmente a r^{-30} . Questo è equivalente a H_{Δ} –0.3 mag/giorno, un ritmo che è sufficientemente elevato da essere sintomatico di un *outburst* cometario o di fenomeni eruttivi. Infatti, l'ampiezza e la velocità di risalita di uno degli *outburst* della C/2002 A2 (LINEAR) implica lo stesso aumento di luminosità media (Sekanina *et al.* 2002). Perciò suggerisco che la *cometa C/2002 O4 sia stata scoperta mentre era in outburst*.

Il 31 luglio, quando H_{Δ} = 9.7 a 1.39 UA dal Sole, è iniziata la seconda fase. La cometa stava aumentando di luminosità a un'andatura sensibilmente inferiore,

ma ancora con una pendenza proporzionale a r^{-12} . L'incremento medio giornaliero equivalente era di -0,14 mag/giorno, all'incirca la metà di quanto avveniva prima del 31 luglio. Questa fase sembra essersi protratta per 10 giorni, finendo 53 giorni prima del perielio, il 9 agosto, quando la magnitudine normalizzata era 8.3 a 1.25 UA dal Sole. Il motivo dell'improvviso cambiamento nella pendenza della curva di luce non è noto, ma suggerisco che abbia a che vedere con una variazione nella produzione di polveri (o nell'attività in generale) durante l'outburst, immediatamente prima del 31 luglio (vedi paragrafo 5). Attorno al 10 agosto, l'incremento della luminosità della cometa rallentò in modo drammatico, segnando l'arrivo della terza fase. La magnitudine normalizzata variava proporzionalmente a $r^{-2.5}$ intorno a metà agosto, a r all'incirca pari a 1.2 UA, ma con una variazione proporzionale solo a r^{-1} a fine agosto, a r all'incirca uguale a 1 UA. Un plateau nella curva è stato raggiunto tra 0.9 e 1 UA, seguito da un accelerato indebolimento a r < 0.9 UA e dalla sua scomparsa al perielio.

La coincidenza temporale tra la cessazione del rapido incremento di luminosità, approssimativamente intorno al 10 agosto, e la fine della principale emissione di polveri a metà agosto, come stabilito nel paragrafo 2.3, è probabilmente significativa da un punto di vista fisico. Ciò potrebbe significare che all'incirca in quel lasso di tempo la sublimazione cometaria (di ghiaccio d'acqua e di altri composti volatili) e la produzione di polveri a essa associata era essenzialmente giunta alla fine, e che, da metà agosto in poi, ogni attività residua della cometa C/2002 O4 era supportata, o correlata, all'erosione del suo nucleo, come proposto nel paragrafo 3.1.

Per esaminare questo possibile scenario in dettaglio, ho cercato di riprodurre la terza fase dell'evoluzione della curva di luce per mezzo di un modello di erosione che ho sviluppato recentemente (Sekanina 2002) per una approfondita indagine sulle curve di luce delle comete radenti al Sole scoperte dai due coronografi installati sul *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO). lo propongo che il processo di erosione della cometa C/2002 O4 sia stato dominato dalla perdita per frammentazione di blocchi, che è iniziata in un determinato momento ed è proseguita continuamente a un ritmo che si suppone seguire lo stesso tipo di legge della sublimazione. Il parametro più critico del modello è una verosimile energia latente di erosione, che è analoga al calore latente di sublimazione.

Il risultato del processo di interpolazione è mostrato come EROSION CURVE in figura 2. La curva rappresenta estremamente bene le osservazioni, rinforzando l'opinione che questa porzione della curva di luce segnali la completa disgregazione della cometa piuttosto che una stasi temporanea. È interessante notare che il risultato indica che l'energia di erosione del nucleo fosse solo 10 000 cal/mole e che quindi fosse più facile l'erosione del nucleo piuttosto che la sublimazione del ghiaccio d'acqua dalla sua superficie, che avrebbe richiesto 11 500 cal/mole a una temperatura di 200 K. Il modello fornisce anche informazioni sul ritmo di contrazione del nucleo nel tempo in seguito all'erosione. Si è trovato che la luminosità della cometa ha raggiunto il picco massimo 27 giorni prima del

perielio, il 5 settembre, a una distanza eliocentrica di 0.93 UA, nel momento in cui le dimensioni del nucleo erano 0.78 volte quelle originali di metà agosto. Si è calcolato che le dimensioni del nucleo si siano ridotte a 0.9 volte le dimensioni iniziali 40 giorni prima del perielio (23 agosto), a 0.63 circa 20 giorni dal perielio (12 settembre), a 0.44 circa 10 giorni prima del perielio, e a 0.22 volte le dimensioni iniziali 1 giorno prima del perielio (ottobre 1.0 ET). Si è calcolato che il nucleo si sia disintegrato completamente in una nube di frammenti entro pochi giorni dal passaggio al perielio.

4. L'orbita

A mano a mano che l'intervallo coperto dalle osservazioni della cometa C/2002 O4 cresceva, la conoscenza della sua orbita andò gradualmente migliorando. All'inizio venne usata un'approssimazione parabolica dell'orbita e vennero ignorate le perturbazioni planetarie. Partendo dai primi di settembre vennero successivamente pubblicate da Marsden (2002a, b) quattro serie di orbite osculatrici, che tenevano conto pienamente degli effetti dei pianeti. Senza includere termini non gravitazionali nelle equazioni del moto, l'orbita originale risultava essere iperbolica, con il valore reciproco del semiasse maggiore pari a $(1/a)_{orig}$ $< -0.0004~{
m UA}^{-1}$. (L'orbita originale di una cometa è determinata dalla sua orbita oscuratrice integrando il moto dell'oggetto dall'epoca di questa orbita indietro nel tempo fino a una sufficientemente grande distanza eliocentrica normalmente circa 50 UA - e riferendola al baricentro del Sistema Solare piuttosto che al Sole).

L'inconsistenza di una semplicistica interpretazione di questo risultato in termini di un'origine interstellare della cometa C/2002 O4 è sottolineata da un evidente andamento sistematico dei valori dell'originale semiasse maggiore. Ne danno prova le quattro serie di elementi orbitali fornite da Marsden, che legano tutte le posizioni astrometriche accurate, a partire dalla prima osservazione riportata in luglio 27.65 TU per finire con le osservazioni fatte rispettivamente in settembre 2.90, 10.83, 13.90 e 23.44 TU. Gli intervalli delle distanze eliocentriche corrispondenti a questi intervalli di tempo sono elencati nella terza colonna della tabella 3. Al migliorare dei dati relativi agli elementi orbitali, ci si poteva aspettare che (1/a)_{orig} convergesse verso qualche limite. Invece, la colonna 4 della tabella 3 mostra che questo valore diventa anche più negativo col passare del tempo, implicando un sistematico aumento dell'eccesso iperbolico. La domanda ovvia è quindi: perché le cose stanno così ?

4.1 Perturbazioni non-gravitazionali

È mostrato più avanti che un andamento sistematico di questo tipo è esattamente quello che ci si deve aspettare se la cometa è soggetta a forze non-gravitazionali. Se l'arco orbitale è abbastanza corto, come nel caso della cometa C/2002 O4 – meno di due mesi – una soluzione formale, gravitazionale, non lascia necessariamente dei residui sistematici dalla traccia orbitale osservata. Invece, le forze non-gravitazionali distorcono gli elementi orbitali in modo da aggiustare il valore forzato della quantità fondamentale impiegata, cioè la costante gravitazionale Gaussiania k_{Θ}

per il Sole. Infatti, le forze non-gravitazionali a cui sono soggetti i nuclei cometari, hanno la forte tendenza ad agire in una direzione opposta a quella della forza gravitazionale del Sole. Il moto di comete attive che non si disintegrano su una scala di tempi brevi, è solitamente affetto da piccole ma rilevabili forze simili a retrorazzi dovute alla sublimazione di sostanze volatili prevalentemente dal lato della superficie del loro nucleo rivolto verso il Sole. Nel caso della cometa C/2002 O4, si sospetta che una frazione significativa delle forze non-gravitazionali provengano dalla pressione di radiazione solare, una volta che la maggior parte della massa della cometa si sia distribuita in frammenti sufficientemente piccoli. Indipendentemente dal rapporto tra i contributi relativi delle due sorgenti, l'oggetto orbita intorno al Sole in un campo gravitazionale che è leggermente più debole di quello del Sole e per il quale la costante gravitazionale gaussiana efficace k_{off} è leggermente più piccola di k_{ω} , mentre gli elementi orbitali sono derivati da k_{α} .

È facile rivelare l'effetto di questa piccola discrepanza sull'orbita. Consideriamo una cometa che si muove intorno al Sole su un'orbita ellittica con periodo P, non perturbata dai pianeti. Questo periodo orbitale è legato al semiasse maggiore a dalla terza legge di Keplero. A partire dalla condizione per cui P = costante, una differenziazione dell'espressione fornisce la seguente relazione tra i piccoli cambiamenti di k e 1/a (eliminando, da ora in poi, il pedice).

$$d\left(\frac{1}{a}\right) = -\frac{2}{3}\left(\frac{1}{a}\right) \cdot \frac{dk}{k_o}.$$
 (6)

Questa equazione mostra che quando una costante gravitazionale k_{Θ} *più grande* di quella corretta k_{eff} viene impiegata in una soluzione orbitale, il reciproco del semiasse maggiore risultante da questa soluzione è *più piccolo* (*più negativo*) del valore corretto 1/a.

Possiamo adesso tirare due conclusioni: (i) il trovare che l'orbita originale della cometa C/2002 O4 derivata con l'uso di k_{Θ} fosse iperbolica, non esclude la possibilità che la vera orbita fosse ellittica; e (ii) la formula (6) rende possibile studiare la grandezza di $k_{\rm eff}$ in termini di variazione di 1/a. La seconda conclusione è importante non solo perché i cambiamenti di 1/a sono facilmente disponibili, ma anche a causa della necessità di trovare come queste variazioni si propagano lungo l'orbita, un problema non risolto dall'equazione (6).

4.2 Variazioni del semiasse maggiore lungo l'orbita

È ben noto che, per ogni k, un'accelerazione radiale (nongravitazionale) $j_R(t)$ (contata positivamente nella direzione antisolare), alla quale il nucleo di una cometa è soggetto al tempo t, causa il seguente cambiamento istantaneo nel semiasse maggiore reciproco:

$$d\left(\frac{1}{a}\right) = -\frac{2e}{k\sqrt{p}}j_{R}(t)\sin v(t)dt,$$
(7)

dove e è l'eccentricità dell'orbita, p = q(1+e) è il parametro dell'orbita, q la distanza al perielio, e v(t) l'anomalia vera al tempo t. Considerato che la questione del segno del fattore d(1/a) è già stața risolta, d'ora in avanti sarà preso in considerazione solo il valore assoluto dell'effetto. Dopo aver sostituito dv con dt, dalla seconda legge di Keplero otteniamo:

$$\left| d\left(\frac{1}{a}\right) \right| = \frac{2e}{k^2 p} j_{\text{\tiny R}}(r) r^2 |\sin v| dv.$$
(8)

Un'accelerazione causata dalla forza non-gravitazionale generata dalla sublimazione del ghiaccio d'acqua varia approssimativamente con r^2 nelle vicinanze del Sole, ma più ripidamente a distanze eliocentriche oltre le ~2 UA. Un'accelerazione causata dalla sublimazione di sostanze più volatili (quali CO_2 , CO, ecc.) cambia con r^2 a distanze maggiori, mentre la pressione di radiazione solare varia con r^2 a qualsiasi distanza dal Sole. Poiché la cometa venne scoperta ad appena 1.5 UA dal Sole, un'approssimazione mediante questa legge della variazione nell'effettiva accelerazione non-gravitazionale j_R nell'equazione (8) è pienamente appropriata. Ho quindi adottato la seguente relazione:

$$j_{R}(r) = j_{0} (r_{0} / r)^{2}, \qquad (9)$$

dove $r_0 = 1$ UA e j_0 è l'accelerazione non-gravitazionale a 1 UA, la quantità che interessa maggiormente in questo studio. Quando la (9) è inserita per j_R nella (8), l'equazione può essere integrata immediatamente. Inoltre, sostituendo v con 1/2v, l'integrazione dell'equazione (8) fino a un'arbitraria località nel tratto pre-perielico dell'orbita, raggiunta dalla cometa al tempo t = t(v), fornisce

$$\frac{1}{a} = f_{\scriptscriptstyle 0} - g_{\scriptscriptstyle 0} \cos^2 \frac{1}{2} v \tag{10}$$

dove f_0 è una costante di integrazione (cioè 1/a estrapolata all'afelio precedente) e

$$g_{0} = \frac{4er_{0}^{2}}{k^{2}p} j_{0} \tag{11}$$

L'espressione (10) è, con ogni evidenza, l'equazione di una linea retta in un grafico di 1/a contro $\cos^2(1/2v)$, dove g_0 è la pendenza.

4.3 Risultati dai calcoli orbitali

Ciascun valore del semiasse maggiore originale derivato da Marsden (2002a, b) è, esattamente come gli altri elementi, una funzione della distribuzione delle osservazioni astrometriche impiegate lungo un dato arco orbitale, dalla prima posizione misurata, al tempo $t_{\rm beg}$, all'ultima, al tempo $t_{\rm end}$, usate nella soluzione orbitale (tabella 3). Le vere anomalie a questi limiti siano, rispettivamente, $v_{\rm beg}$ e $v_{\rm end}$, e le osservazioni siano distribuite più o meno

uniformemente lungo l'intervallo. Allora, il valore di 1/a dovrebbe, in accordo con l'equazione (10), riferirsi a un punto molto vicino al centro del corrispondente intervallo. Allora, il termine cos²1/2v del membro di destra dell'equazione (10) può essere approssimato dal valore medio lungo il relativo arco orbitale,

$$\left\langle \cos^2 \frac{1}{2} v \right\rangle = \frac{1}{2} \left(\cos^2 \frac{1}{2} v_{\text{beg}} + \cos^2 \frac{1}{2} v_{\text{end}} \right).$$
 (12)

L'anomalia vera media v_{aver}, definita come

$$v_{acc} = 2 \arccos \sqrt{\left\langle \cos^2 \frac{1}{2} v \right\rangle}$$
 (13)

ed elencata nella quinta colonna della tabella 3, completa le informazioni necessarie per trovare i parametri f_0 e g_0 dall'equazione (10). Sebbene il numero delle osservazioni astrometriche usate sia aumentato solo del 20% dal primo all'ultimo processo di calcolo (colonna 6), l'errore formale del semiasse maggiore, dipendendo criticamente dalla lunghezza dell'arco orbitale, è diminuito di un fattore 4.6. Per questa ragione io ho usato una soluzione coi minimi quadrati pesati per trovare

$$f_0 = +0.00115 \pm 0.00022 \text{ UA}^{-1}$$
 (14a)
 $g_0 = +0.00254 \pm 0.00030 \text{ UA}^{-1}$ (14b)

I residui o-c, osservato meno calcolato, sono elencati nell'ultima colonna di tabella 3, confermando che la soluzione è molto soddisfacente in quanto nessun residuo supera di 0.6 volte l'errore medio formale nei valori dell'originale semiasse maggiore reciproco.

Con $k \approx k_{\Theta} = 0.017202\overline{1} \text{ UA}^{3/2}/\text{giorno}$ e gli elementi $p \cong 1.5531$ UA ed $e \cong 1.00086$ dall'orbita più recente di Marsden (2002b), si trova dall'equazione (11)

$$j_0 = (2.29 \pm 0.34) \times 10^{-7} \text{ UA/giorno} = (5.84 \pm 0.69) \times 10^{-4} \text{ cm/s}^2$$

Il valore risultate di j_0 indica la presenza di un effetto importante. Paragonata con altre comete del catalogo delle orbite di Marsden e Williams (2001), la cometa C/2002 O4 appartiene ai corpi il cui moto devia dalla legge gravitazionale nel modo più significativo, anche se confronti quantitativi sono difficili in quanto, per tutte le comete osservate estesamente, per le quali si possono derivare i parametri non-gravitazionali, sono stati calcolati sia le componenti trasversali che quelle radiali. Il mio risultato è equivalente a un parametro non-gravitazionale radiale di $A_{\perp} = 29 \pm 3$ unità in uno scenario nel quale $A_{2} = 0 \text{ e } A_{3} = 0.$

Il ritrovamento di questo effetto dinamico risponde alla cruciale domanda di che cosa accadde alla cometa C/2002 O4: essa si è veramente disintegrata in una nuvola di frammenti minori e polveri, in maniera analoga alla cometa C/1999 S4 (LINEAR) e altre simili. In effetti, se la cometa C/2002 O4 fosse rimasta intatta e divenuta semplicemente «dormiente», il suo moto orbitale sarebbe stato (quasi) puramente gravitazionale.

Interpretata come un effetto combinato di pressione di radiazione solare e di forza non-gravitazionale provocata dalla sublimazione, l'accelerazione j_0 pone ovviamente un limite superiore a entrambe queste cause. Poiché l'accelerazione gravitazionale solare a 1 UA dal Sole è 0.593 cm/s², l'effetto della pressione di radiazione è minore di 0.0010 ± 0.0001 unità di attrazione solare. Questo limite è equivalente a un limite inferiore nel diametro delle particelle di polvere pari a 0.23 cm per una densità complessiva di 0.5 g/cm³, e 0.58 cm per una densità di 0.2 g/cm3. Queste dimensioni minime sono maggiori solo di circa un fattore 2 rispetto alle dimensioni delle più piccole particelle della coda ricavate nel paragrafo 2.2.

Si possono ora imporre alcune restrizioni sulla vera orbita originale della cometa. Sfortunatamente, le sue dimensioni non possono essere determinate con molta precisione, perché è sconosciuto il tempo in cui hanno iniziato ad agire le maggiori forze non-gravitazionali. Comunque, visto che la cometa era attiva già al momento della sua scoperta, si può ragionevolmente concludere che le perturbazioni non gravitazionali del suo moto orbitale fossero iniziate prima del 22 luglio. Se accettiamo, abbastanza conservativamente, che l'attività iniziò circa 90 giorni prima del suo arrivo al perielio (agli inizi di luglio, vedi paragrafo 2.3) allora $v \approx -97^{\circ} \text{ e } (1/a)_{\text{orig}} = +0.00003 \pm 0.00025 \text{ UA}^{-1}, \text{ mostrando}$ che l'orbita originale potrebbe essere stata con eguale probabilità un'ellisse o un'iperbole. La stima piuttosto incerta del periodo della prima attività (fine maggio, cfr. tabella 2) richiede un'anomalia vera di circa -109° e implica che molto probabilmente l'orbita originale fosse ellittica, con un reciproco semiasse maggiore di +0.00029 ±0.00024 UA-1 e un probabile periodo orbitale di circa 200 000 anni. Comunque questo risultato è molto incerto, non solo per i dubbi circa l'inizio del periodo di attività, ma anche perché l'orbita è stata influenzata da una componente trasversale sconosciuta di perturbazioni non-gravitazionali causate dalla sublimazione

5. Un modello per l'outburst

Outburst, o improvvisi aumenti di luminosità, di comete sono piuttosto comuni, ma appena l'evento giunge al termine l'oggetto interessato ritorna gradualmente al suo aspetto originario. Perciò, di norma, la curva di luce di un outburst è caratterizzata da un breve tempo di risalita seguito da un tempo lungo di declino. Queste variazioni di luminosità sono accompagnate simultaneamente da modificazioni morfologiche della chioma. Una simile evoluzione è, per esempio, mostrata ripetutamente dalla cometa 29P/Schwassmann-Wachmann e da molte altre. Come già ricordato nel paragrafo 3.2, un esempio eccellente di outburst ricorrenti è stato mostrato recentemente dalla cometa C/2001 A1 (Sekanina et al. 2002). Una delle implicazioni degli outburst, raramente menzionata in letteratura, è stata sottolineata molto tempo fa da Richter (1948), il quale concluse che un'elevata percentuale di scoperte cometarie non confermate (piuttosto comuni in periodi di lenta comunicazione) può essere riferita a comete molto deboli accidentalmente riprese in outburst



e immediatamente perse in seguito al loro ritorno a un livello normale.

Si deve sottolineare che l'outburst della cometa C/2002 O4 fu fondamentalmente differente. Il suo tempo di salita è stato relativamente lungo, oltre 10 giorni di durata, e non fu seguito da un declino. Perciò il processo di improvvisa attivazione non ha coinvolto solo una locale, isolata sorgente di ghiacci volatili sul nucleo, ma esso apparentemente interessò una riserva maggiore estesa su una significativa frazione della superficie, poiché dal 31 luglio al 9 agosto la cometa continuò ad aumentare rapidamente in luminosità, sebbene non a un ritmo così elevato come in precedenza (figura 2). Sembra che una cometa possa tenere sotto controllo un *outburst* minore o di moderata entità, ma non uno di proporzioni catastrofiche in relazione alle dimensioni del suo nucleo. Una grande cometa, come la 29P/Schwassmann-Wachmann, può sopravvivere intatta a più potenti outburst rispetto a una piccola come la C/2002 O4.

Durante questo critico intervallo di tempo, la cometa C/ 2002 O4 è stata osservata nell'infrarosso termico da Sitko et al. (2002) l'1.54 agosto TU. I loro risultati indicano la presenza di grani di dimensioni inferiori al micrometro, con un surriscaldamento pari a 1.15 ±0.08 e una struttura dei silicati con un picco del 20 percento sopra il continuo. La magnitudine riportata nella stretta banda passante [M] (centrata a una lunghezza d'onda di 4.8 micrometri) suggerisce un'area della sezione trasversale delle polveri piuttosto piccola, all'incirca di soli 30 km², sebbene questo può essere in parte uno sconosciuto effetto di apertura. In ogni caso, all'incirca nello stesso tempo, il 31.0 luglio TU, la magnitudine visuale totale (paragrafo 3.2), se dovuta completamente alla polvere che diffondeva la luce solare, implica un'area della sezione trasversale di circa 9000 km², assumendo un albedo geometrico di 0.04. Per una densità delle polveri di 0.5 g/cm³ e una distribuzione delle dimensioni relativamente piatta con una legge esponenziale con pendenza di -2.8, la massa $M_{\rm a}$ della nube di polveri corrispondente all'area della sezione trasversale del 31 luglio è stimata pari a:

$$M_{\rm d} = 1 \times 10^{-13} a_{\rm max}$$
 grammi

dove a_{max} (in cm) è il raggio della particella (o frammento) più grande. Perfino con una stima conservativa di a = 1cm, la massa derivata per il materiale emesso è equivalente a una sfera di oltre 0.4 km di diametro!

La velocità di produzione delle polveri dipende strettamente dal tempo di vita dei grani nella chioma. Tuttavia, poiché le particelle più grandi sono sempre emesse dai nuclei cometari con velocità basse, al più dell'ordine di decine di metri al secondo, e poiché il diametro della chioma della C/2002 O4 all'inizio di agosto è stata stimata intorno ai 5', ovvero 200 000 km di diametro, non è difficile dimostrare che il minimo tempo di vita delle particelle più grandi potrebbe facilmente estendersi oltre alcune settimane. Così è concepibile che quasi tutta la polvere emessa dall'inizio dell'outburst si sia accumulata nella chioma tra la fine di luglio e l'inizio di agosto.

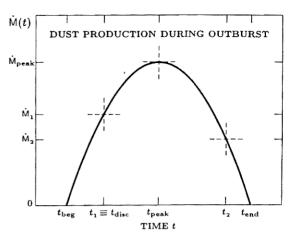


Figura 3. Un modello di scenario per l'outburst della cometa C/2002 O4. L'evento inizia al tempo $t_{
m beg}$ e termina al tempo $t_{
m end}$. A $t_{
m peak}$, a metà strada tra $t_{\rm beg}$ e $t_{\rm end}$ la produzione di polveri raggiunge il suo massimo, \dot{M}_{pouls} . Le velocità di produzione \dot{M}_1 e \dot{M}_2 , raggiunte rispettivamente negli istanti t, (corrispondente al momento della scoperta, t_{soc}) e t_{soc} sono assunti come restrizioni al modello stabilendo che il rapporto della massa di polveri accumulata nel materiale eiettato nell'intervallo da $t_{
m hea}$ a $t_{\it r}$ e la massa accumulata da $t_{\rm beg}$ a t_2 sia consistente con l'aumento osservato di luminosità osservato tra t_1 e t_2 . La variazione della massa di polveri è stata normalizzata richiedendo che l'area della sezione trasversale delle polveri accumulate nella chioma si accordasse alla luminosità totale per dati valori di albedo e densità delle polveri e per una data distribuzione delle dimensioni delle particelle di polvere

Un semplice modello, formulato con questa premessa, permette di descrivere l'outburst in maggior dettaglio. Si assume che l'evento sia iniziato nell'istante t_{beg} e che sia finito nell'istante t_{end} . Il profilo temporale della velocità di produzione di polveri $\dot{M}_d(t)$ è postulato essere simmetrico e di andamento parabolico, raggiungendo il massimo valore \dot{M}_{peak} all'istante $t_{peak} = \frac{1}{2} (t_{bea} + t_{end})$, cioè,

$$\dot{M}_{d}(t) = 4\dot{M}_{peak} \frac{(t - t_{heg})(t_{ead} - t)}{(t_{ead} - t_{heg})^{2}},$$
(17)

dove $t_{\text{beg}} < t < t_{\text{end}}$. Si è assunto che $\dot{M}_d = 0$ al tempo $t \le t_{\text{beg}}$ e $t \ge t_{\text{end}}$ anche se non è generalmente così. Il modello è descritto schematicamente in figura 3. La quantità di massa accumulata nella chioma al tempo t è uguale a

$$M_{d}(t) = \int_{t_{heg}}^{t} \dot{M}_{d}(t)dt = 2\dot{M}_{peak} \frac{(t - t_{heg})^{2}}{t_{end} - t_{heg}} \left[1 - \frac{2}{3} \frac{t - t_{heg}}{t_{end} - t_{heg}} \right].$$
(18)

La massa totale delle polveri, $M_{\rm total}$, emessa durante l'outburst, è naturalmente uguale a $M_d(t_{end})$, ovvero

$$M_{_{outd}} = \frac{2}{3} \dot{M}_{_{peak}} (t_{_{end}} - t_{_{beg}}). \tag{19}$$

Poiché la produzione di polveri media durante l'outburst è $\dot{M}_{aver} = M_{\rm total} / (t_{\rm end} - t_{\rm beg})$, si trova direttamente dall'equazione (19) che $\dot{M}_{aver} = 2/3 M_{\rm peak}$. Per vincolare lo scenario dell'*outburst*, l'ho messo in

relazione con quanto avevo trovato nel paragrafo 3.2,

che la luminosità della cometa, normalizzata a 1 UA dalla Terra, variasse proporzionalmente a r^{30} tra le distanze eliocentriche $r_1 = r(t_1)$ e $r_2 = r(t_2)$ (con $t_1 < t_2$). Identificando t_1 con il 22.0 luglio (il momento della scoperta, $t_{\rm disc}$) e t_2 con il 31.0 luglio TU, e assumendo che la legge di distribuzione delle dimensioni delle particelle di poveri non cambiasse nel tempo, e supponendo che la luminosità variasse secondo una legge inversamente proporzionale al quadrato della distanza, si può definire il rapporto delle masse contenute nella chioma nei due istanti

$$\mu_{12} = \frac{M_{_{d}}(t_{_{1}})}{M_{_{d}}(t_{_{2}})} = \left(\frac{r_{_{1}}}{r_{_{2}}}\right)^{-28} \cong 0.091.$$
(20)

Confrontando la (18) con la (20), le condizioni stabilite richiedono che

$$\mu_{12} = \left(\frac{t_1 - t_{beg}}{t_2 - t_{beg}}\right)^2 \frac{2t_1 + t_{beg} - 3t_{end}}{2t_2 + t_{beg} - 3t_{end}},$$
(21)

da cui è possibile stabilire la relazione tra t_{beg} e t_{end} in termini di t_1 , t_2 e μ_{12} . Risulta che la condizione (21) porta a un'equazione cubica dove $X = t_{\text{end}} - t_{\text{beg}} > 0$ come segue

$$X' - \frac{3}{1 - \mu_{12}} \left[\left(t_{ond} - t_1 \right) - \mu_{12} \left(t_{ond} - t_2 \right) \right] X + \frac{2}{1 - \mu_{12}} \left[\left(t_{ond} - t_1 \right) - \mu_{12} \left(t_{ond} - t_2 \right) \right] = 0.$$
(22)

L'outburst non può essere terminato prima del tempo t_2 (31 luglio), perché allora non potrebbe essere spiegato il continuo e rapido aumento di luminosità della cometa. Tuttavia, l'outburst potrebbe avere iniziato a decrescere o anche finire dopo il tempo t_2 , come riportato in figura 3. Ma, un proseguimento dell'outburst dopo metà agosto è da scartare per l'improvviso cambiamento della pendenza della curva di luce intorno al 10 agosto.

Di conseguenza, l'equazione cubica è stata risolta per un tempo di fine dell'*outburst t*_{end} compreso tra il 31 luglio e il 16 agosto. Per questi valori di t_{end} , l'equazione (22) ha tre soluzioni reali, una sola delle quali ha senso fisico. I risultati, riportati nella tabella 4, permettono di trarre le seguenti conclusioni: (i) l'istante di inizio dell'outburst è praticamente indipendente dalla scelta del tempo di fine, (ii) la cometa sembra essere stata scoperta circa 2-3 giorni dopo l'inizio dell'outburst, (iii) il picco di velocità nella produzione di polveri, sebbene anch'esso poco sensibile alle soluzioni scelte, mostra un largo minimo di 1.3×10⁷ g/s per la data di termine del 5 agosto; (iv) la massa totale di polvere emessa durante l'evento risulta essere stata all'incirca 1-2×10¹³ g; e (v) l'outburst apparentemente si è prolungato su un periodo di almeno 11 giorni e forse lungo 4 settimane, sebbene io preferisca una soluzione con una

durata non superiore a circa 3 settimane.

La massima velocità di produzione delle polveri, dell'ordine di 10⁷ g/s, è enorme e del tutto inattesa a una distanza eliocentrica prossima a 1.4 UA. Per esempio, la produzione di polveri della cometa di Halley ha raggiunto all'incirca 4×10⁷ g/s al perielio (q = 0.59 UA) secondo Fulle *et al.* (1988). La loro migliore interpolazione suggerisce che la produzione di polveri fosse solo 1.5×10⁶ g/s a una distanza dal Sole di 1.4 UA, minore di circa un fattore 10 rispetto ai risultati di tabella 4 per la cometa C/2002 O4. Sulla base dei risultati di Schleicher *et al.* (1998) sulla velocità di produzione di acqua, risulta che intorno al perielio il rapporto della velocità di produzione polvere/acqua della 1P/Halley era in media 1.5.

D'altra parte, la produzione di particelle solide della C/1995 O1 (Hale-Bopp) ha raggiunto, per un albedo assunto pari a 0.04, 2×10⁷ g/s già a una distanza di 4 UA (Fulle *et al.* 1998a), ma, alla temperatura molto bassa coinvolta, gran parte della massa era apparentemente contenuta in grani di ghiaccio d'acqua. Infatti, Bivar *et al.* (1999) trovano che, a 4 UA, la velocità di produzione era 1.5×10⁶ g/s per l'acqua e 4×10⁶ g/s per il monossido di carbonio, nonostante il rapporto nella emissione gassosa tra la massa dell'H₂O rispetto al CO fosse circa 3 al perielio (0.91 UA).

Questi e altri risultati analoghi relativi ad altre comete indicano che, in circostanze normali (quando l'emissione di gas avviene solamente su una piccola frazione della superficie del nucleo), è necessario un nucleo molto grande (all'incirca superiore a 10 km di diametro), per rendere conto della produzione di polveri elencata in tabella 4 per la cometa C/2002 O4. Le indicazioni sono che questa cometa non fosse grande. Ci sono due tipi di argomentazioni per spiegare questa apparente discrepanza.

La prima categoria di argomentazioni riguarda problemi con le assunzioni. Per esempio, potrebbe essere che gran parte della luce dalla C/2002 O4 in prossimità di 1.4 UA fosse emessa nelle bande del carbonio molecolare piuttosto che dalla diffusione delle polveri; oppure che la funzione di distribuzione delle dimensioni delle polveri potesse essere più ripida di quanto assunto nell'equazione (16), nel qual caso la stessa area della sezione trasversale osservata corrisponderebbe a una massa totale di polveri coinvolta molto inferiore. Poiché non è reperibile alcun dato fotometrico a banda stretta e la funzione di distribuzione delle dimensioni delle polveri è sconosciuta (ignorando il debole vincolo basato sulle osservazioni infrarosse di Sitko et al.) tale argomentazione non può essere né scartata né confermata.

Tuttavia, può esserci una spiegazione plausibile anche nel caso che la massa di polvere dedotta sia corretta? Un punto critico è trovare un'adeguata fonte di energia. Un tratto favorevole del problema è che la massa di polveri emessa in un grande *outburst* come questo può essere considerevolmente più grande rispetto alla massa dei composti volatili che provvedono a fornire l'energia richiesta. In altre parole, il rapporto tra la velocità di

produzione di massa tra polveri e gas può essere molto elevato, forse 10 o anche di più, con la richiesta velocità di degasamento di massa semplicemente attorno a 10^6 g/s. Una valutazione numerica di questo scenario è chiarificante. Ad una distanza dal Sole di 1.4 UA la velocità di sublimazione dell'acqua per unità di area superficiale è circa $23 \, \mu g/cm^2/s$ sul punto sub-solare del nucleo, e in media, circa $10 \, \mu g/cm^2/s$ sull'emisfero illuminata del nucleo. L'area richiesta per l'emissione gassosa è quindi stimata in circa $10 \, km^2$ e questo richiede un effettivo diametro del nucleo di $2.5 \, km$, quasi certamente troppo grande.

Quali sono i risultati nel caso di sublimazione di monossido di carbonio, che è sostanzialmente più volatile del ghiaccio d'acqua? Il livello di sublimazione nel punto sub-solare a 1.4 UA è ora 300 μg/cm²/s, e una media velocità di sublimazione sull'emisfero illuminato vale all'incirca la metà di tale valore. Quindi è richiesta una area di sublimazione sull'emisfero diurno di circa 0.7 km², e il diametro effettivo del nucleo è appena 0.7 km, una dimensione più plausibile. Con la densità utilizzata nell'equazione (16) la massa iniziale di questa cometa potrebbe essere di 8×10¹³ g, il che significa che fino a tre decimi della massa sono stati spesi nell'*outburst*!

Il quadro che emerge da questo scenario (non necessariamente l'unico) è che il massiccio outburst della cometa C/2002 O4 può essere spiegato se si assume che l'intero nucleo sia stato coinvolto in un'esplosione provocata dall'improvvisa esposizione di una riserva di ghiacci molto instabili, tipicamente monossido di carbonio. Si può solo speculare sui dettagli del processo (come la liberazione di una estesa rete di fessure superficiali, ecc...), ma la tenuta complessiva del nucleo è chiaramente critica per una interpretazione che abbia buon esito.

6. Sommario e conclusioni

Esaminando l'orientamento e la morfologia della coda della cometa C/2002 O4, la sua curva di luce, e il suo moto orbitale anomalo, e creando un modello per il suo *outburst* principale, sono stato in grado di descrivere l'apparente sequenza di eventi subiti dall'oggetto e di individuare il motivo della sua sparizione.

Lo scenario proposto, che naturalmente è uno dei tanti, considera che la cometa sia stata scoperta durante un importante e longevo *outburst*. Questo episodio è stato rilevato sia nella curva di luce sia nei dati dell'orientamento della coda. Una debole attività deve essere stata presente per un certo tempo prima dell'inizio dell'*outburst*, forse dall'inizio di luglio o perfino prima. L'*outburst* ha avuto inizio molto probabilmente durante il 19 luglio, 2-3 giorni prima della scoperta, ed è durato almeno fino alla fine di luglio o forse anche fino a metà agosto. La produzione di povere durante l'*outburst* ha raggiunto livelli molto elevati (con un picco superiore a 10 ton/s) e la massa totale di polveri spesa nel corso dell'evento è stimata in 10-20 milioni di tonnellate. Considerazioni sul bilancio

energetico richiedono che l'intero nucleo di dimensioni inferiori al chilometro sia coinvolto in una esplosione attivata da una grande riserva di ghiacci molto volatili, come il monossido di carbonio.

Lo sviluppo che è seguito all'outburst appare esserne la conseguenza. Alla metà di agosto la cometa deve avere perso una frazione significativa (fino al 30%) della sua massa iniziale, e il nucleo rimanente era stato così fortemente scosso dall'esplosione che non è riuscito a rimanere monolitico. L'estensione del danno strutturale sofferto dalla cometa e lo stress al quale è stato esposto durante l'ouburst è stato semplicemente troppo grande. Come risultato, è iniziata una frammentazione in blocchi, un processo praticamente spontaneo, come illustrato dal basso valore dell'energia latente di erosione del nucleo – inferiore a quella del calore di sublimazione del ghiaccio d'acqua.

Il moto orbitale anomalo della cometa C/2002 O4 e il susseguente rapido calo e la finale scomparsa della condensazione nucleare e dell'intera testa cometaria nella immediata prossimità del perielio, a fine settembre e all'inizio di ottobre, furono tutti segnali della reale e completa disintegrazione del nucleo.

A causa del numero limitato di dati osservativi, è difficile fornire un resoconto più completo dell'evoluzione della cometa C/2002 O4. Tuttavia lo scenario presente illustra le evoluzioni peculiari delle comete. Diversamente dagli asteroidi, che per frammentarsi devono entrare in collisione con un altro la cui energia cinetica all'impatto superi la forza strutturale del bersaglio, i nuclei cometari, noti per essere oggetti poco coerenti, manifestano la tendenza - alcuni più, altri meno- a soccombere agli effetti della loro stessa attività, che può apparire relativamente benigna secondo standard non cometari. Sebbene sia noto da tempo che la frammentazione possa verificarsi occasionalmente sulle comete, il suo effetto sul nucleo cometario è stato molto sottovalutato. Probabilmente la ragione di questa carenza è osservativa. Anche il processo di erosione per frammentazione sembra essere assai più comune di quanto pensato in precedenza; di fatto può competere con la disattivazione nel porre fine alla vita di una cometa attiva. Diversamente dalla inattività, la disintegrazione è naturalmente irreversibile. E anche se la tendenza a sbriciolarsi varia da cometa a cometa, una continua frammentazione a cascata sembra giocare un ruolo nel ciclo di vita della maggioranza (se non di tutte) le comete. La cometa C/2002 O4 (Hönig) ci ha appena dato una rapida visione d'insieme di che cosa sia la frammentazione cometaria.

Ringraziamenti

Questa ricerca è stata condotta al *Jet Propulsion Laboratory*, *California Insitute of Technology*, sotto contratto con la *National Aeronautics and Space Administration*.



TABLE 1 Ephemeris for Dust-Tail Orientation of Comet C/2002 O4 (eq. J2000.0).

	Time from peri-	Comet's					Predicted position angle P.A. and apparent length L for dust tail formed at given time before perihelion $^{ m b}$									
Date		dista:		Earth's cometo-	Position angle ^a		100 days		80 days		60 days		40 days		20 days	
2002 (0h ET)	helion (days)	Earth	Sun	centric latitude	PA(RV)	PA(-V)	P.A.	L	P.A.	L	P.A.	L	P.A.	L	P.A.	L
July 25	-68.98	0.789	1.470	+24°	227°	200°	219°	0'.3	227°	<0′.1						
Aug. 4	-58.98	0.674	1.333	+14	211	196	206	0.8	208	0.2	210°					
14	-48.98	0.655	1.199	0	173	173	173	1.5	173	0.7	173	0.1				
24	-38.98	0.727	1.071	-13	73	87	79	2.2	78	1.2	76	0.4	73°			
Sept. 3	-28.98	0.854	0.954	-22	45	72	58	2.8	56	1.8	53	0.8	49	0.1		
13	-18.98	1.000	0.859	-28	30	68	51	3.4	48	2.4	45	1.4	40	0.5	31°	
23	-8.98	1.142	0.796	-32	15	64	45	4.2	43	3.2	39	2.1	34	1.0	24	0.
	+1.02	1.265	0.776	-35	358	59	39	5.2	36	4.1	33	2.9	27	1.7	18	0.8
Oct. 3		1.359	0.805	-37	340	53	32	6.4	30	5.3	26	4.0	21	2.6	12	1.
13	+11.02		0.803	-39	322	48	26	7.6	23	6.5	20	5.2	14	3.7	5	1.9
23 Nov. 2	$+21.02 \\ +31.02$	1.421 1.455	0.876	39 40	309	45	20	8.8	17	7.8	14	6.5	8	4.9	0	2.9

TABLE 2 ORIENTATION AND LENGTH OF THE TAIL OF COMET C/2002 O4 (EQ. J2000.0).

	Time from peri-	Earth's cometo-	Position angle		Observed position	apparent	Derived dust	Derived radiation pressure accel-		
Date 2002 (UT)	helion (days)	centric latitude	PA(RV)	PA(-V)	angle of tail	length of tail	ejection time*	eration ^b	Observer(s)	Note
July 27.65	-66.33	+22°	223°4	199°4	213°	1′.8	(-129)	(0.003)	Kadota	1,2
27.85	-66.13	+22	223.1	199.4	215	3	(-109)	(0.005)	Sanchez	1
28.84	-65.14	+21	221.6	199.1	217	2.5	-85	0.029	Ligustri, Degano	3
Aug. 2.88	-60.10	+15	213.0	197.1	211	2.5	-71	0.072	Ligustri, Degano	3
3.90	-59.08	+14	211.0	196.4	~205	1	(-106)	(0.002)	Tichá, Tichý	4
5.70	-57.28	+12	207.0	195.0	207	4			Kadota	2
7.99	-54.99	+9	201.0	192.3	199	1	(-77)	(0.005)	Nicolini	3
12.91	-50.07	+2	180.4	178.8	182	6			Ligustri	3
13.90	-49.08	0	173.7	173.6	174	8			Gonano et al.	3,5
13.91	-49.07	0	173.7	173.5	175	18			Meyer	6
14.04	-48.94	0	172.7	172.7	174	6			Ligustri	3,5
15.89	-47.09	-3	155.8	158.6	157	5			Kopplin	7
19.01	-47.09 -43.97	-7	117.1	124.3	117				Jäger	7,8
19.01	-43.97 -43.01	-7 -8	105.6	114.2	107	5	(-58)	(0.045)	Degano	3
21.07	-43.01 -41.91	_9	94.2	104.3	97		(–73)		Jäger	7
30.85	-32.13	-19	50.9	74.0	58	4	`-67 [´]	0.008	Ligustri, Degano	3
	-32.13 -30.08	-19 -21	46.9	72.6	56	6.5	-69	0.011	Kopplin	7
Sept. 1.90	-30.08 -29.07	-21	45.1	72.0	57	5	-87	0.005	Kopplin	7
2.91		-22 -24	40.5	70.8	49	2.5	-54	0.007	Montanucci	3,5
5.81	-26.17		37.6	70.1	48	3.5	-57	0.008	Ligustri, Savani	3
7.79	-24.19	-25		69.7	48	3.5	-60	0.006	Kopplin	7
8.84	-23.14	-26	36.1	67.6	47	3.0	-78	0.002	Ligustri	3,5
14.80	-17.18	-29	27.7	60.9	37	4	-67	0.003	Ligustri	3,5
28.77	-3.21	-33	5.9 4.2	60.4	37	2.5	-71	0.002	Ligustri	3,5
29.77	-2.21	-34		59.8	37	5	74	0.003	Sostero	3,5
30.75	-1.23	-34	$\frac{2.4}{2.4}$	59.8	36	4	-68	0.002	Jäger	5,7,8
30.76	-1.22	-34		59.8 59.2	36	3	-72	0.002	Ligustri	3
Oct. 1.75	-0.23	-34	0.7		30	6	-78	0.002	Kadota	2
10.82	+8.84	-36	343.9	54.1	23	8	-57	0.004	Ohshima	9
16.80	+14.82	-37	332.9	51.0 46.3	23 19	6	-73	0.004	Kadota	2
27.83	+25.85	-39	315.3	40.3	19	0	- 10	0.002		

^a Corresponding to the position angle of the tail's axis and expressed in days from perihelion; negative sign indicates time before perihelion. A parenthesized value means that ejection time is uncertain because the tail's dust nature is unclear (July 27.85), or the tail is too diffuse and/or short (July 27.65 and Aug. 3.90), or Earth is too close to the comet's orbital plane (Aug. 7.99, 19.97, and 21.07).

^b Corresponding to the apparent tail length for the given ejection time and expressed in units of the solar gravitational acceleration (0.593 cm/s² at 1 AU from the Sun).

NOTES:

Hergenrother (2002).

- 2. http://www.astro.web.sh.cwidc.net/ageo/comet/2002O4.
 3. http://www.uai.it/sez_com/2002o4.

- 3. http://www.latt.org/ck020040.html.
 4. http://www.latt.org/ck020040.html.
 5. http://cfa-www.harvard.edu/icq/CometMags.html.
 7. http://www.fg-kometen.de/pix/pc0204.e.htm.
 8. http://www.astrostudio.at/defaultNets.htm.
 9. http://www.hi-ho.ne.jp/hirohisa-sato/Index/c200204.htm.

^{*} RV is the projected extended radius vector (antisolar direction); -V is the projected reverse orbital-velocity vector (direction of the orbit behind the comet).

The tail is assumed to contain dust grains that are subjected to radiation-pressure accelerations not exceeding 0.2 percent of the solar gravitational acceleration; these grains are all greater than 0.76 millimeter in diameter for a density of 0.5 g/cm³ and greater than 2.8 millimeter in diameter for 0.2 g/cm³.

TABLE 3 LEAST-SQUARES FIT TO ORIGINAL RECIPROCAL SEMIMAJOR AXIS OF COMET C/2002 O4 FROM MARSDEN'S ORBITAL RUNS.

	Orbital run							
Run No.	Dates covered by astrometry, 2002 (UT)	Range of distances from Sun, r (AU)	Original reciprocal semimajor axis, $(1/a)_{\text{orig}} (AU^{-1})$	Average true anomaly, $v_{ m aver}$	No. obs. used	Residual $o-c$ for $(1/a)_{orig}$ from weighted solution (AU^{-1})		
1	July 27.65-Sept. 2.90	1.434-0.955	-0.000520 ± 0.000096	-69°.27	946	+0.000053		
2	July 27.65-Sept. 10.83	1.434-0.877	-0.000694 ± 0.000054	-64.76	984	-0.000029		
3	July 27.65-Sept. 13.90	1.434-0.852	-0.000717 ± 0.000031	-63.07	1088	-0.000018		
4	July 27.65-Sept. 23.44	1.434-0.794	-0.000772 ± 0.000021	-58.72	1135	+0.000011		

TABLE 4 MODEL SCENARIOS FOR THE OUTBURST OF COMET C/2002 O4.

Outburst t	ermination	0 11 -1	Outburs	t inception	Peak rate of dust	Distance from Sun at	Total mass of dust lost in outburst (10 ¹³ g)	
Date 2002 (UT)	Days after discovery	Outburst duration (days)	Date 2002 (UT)	Days before discovery	production (10 ⁷ g/s)	production peak (AU)		
July 31.0	9.0	11.1	July 19.9	2.1	1.6	1.46	1.0	
Aug. 2.0	11.0	13.4	19.6	2.4	1.4	1.45	1.1	
4.0	13.0	15.6	19.4	2.6	1.3	1.44	1.2	
6.0	15.0	17.8	19.2	2.8	1.3	1.43	1.4	
8.0	17.0	19.9	19.1	2.9	1.3	1.42	1.6	
10.0	19.0	22.0	19.0	3.0	1.4	1.40	1.8	
12.0	21.0	24.1	18.9	3.1	1.4	1.39	2.0	
14.0	23.0	26.2	18.8	3.2	1.5	1.38	2.2	
16.0	25.0	28.2	18.8	3.2	1.5	1.36	2.5	

Bibliografia

- [1] Biver N., Bockelée-Morvan D., Colom P., Crovisier J., Germain B., Lellouch E., Davies J. K., Dent W. R. F., Paubert R. G., Wink J., Despois D., Lis D. C., Mehringer D., Benford D., Gardner M., Phillips T. G., Gunnarsson M., Rickman H., Winnberg A., Bergman P., Johansson L. E. B., and Rauer H., Moon Earth Plan. 78, 5-11 (1999).
- [2] Fulle, M., Barbieri C. and Cremonese G, Astron Astrophys. 201, 362-372 (1988).
- [3] Fulle, M., Cremonese G. and C. Böhm, Astron. J. 116, 1470-1477 (1998a).
- [4] Fulle M., Mikuz H., Nonino M. and Bosio S., Icarus 134, 235-248 (1998b).
- [5] Green D. W. E. (ed.), IAU Circ. 7995 (2002).
- [6] Hergenrother C. W. (ed.), IAU Circ. 7939 (2002).
- [7] Marsden B. G., MPEC 2002-R15, 2002-R48, and 2002-S10 (2002a).
- [8] Marsden B. G., MPC 46762 (2002b).
- [9] Marsden B. G. and Williams G. V. (2001), Catalogue of Cometary Orbits 2001, 14th ed.; Cambridge: Smithsonian Astrophysical Observatory, Planetary Sciences Division.
- [10] Richter N., Sterne 24, 52-54 (1948).
- [11] Schleicher D. G., Millis R. L. and Birch P. V., Icarus 132, 397-417 (1998).
- [12] Schorr, R., Astron. Nachr. 196, 291-292 (1926).
- [13] Sekanina Z., *Icarus* **58**, 81-100 (1984).
- [14] Sekanina, Z. (2002). "Erosion model for the sungrazing comets observed with the Solar and Heliospheric Observatory", to be submitted to Astrophys. J.
- [15] Sekanina Z.; Jehin E., Boehnhardt H., Bonfils X., Schuetz O. and D. Thomas, Astrophys. J. 572, 679-684 (2002).
- [16] Sitko, M. L., Lynch D. K., Russell R. W., Hammel H. B., and Polomski E., IAU Circ. 7950 (2002).
- [17] Weaver H. A., Sekanina Z., Toth I., Delahodde C. E., Hainaut O. R., Lamy P. L., Bauer J. M., A'Hearn M. F., Combi M. R., Davies J. K., Feldman P. D., Festou M. C., Hook R., Jorda L., Keesey M. S. W., Lisse C. M., Marsden B. G., Meech K. J., Tozzi G. P. and West R., Science 292, 1329-1334 (2001).

