

Strutture a larga scala nella chioma e nella coda iniziale della Hale-Bopp

Giannantonio Milani

SEZIONE COMETE

(Relazione presentata al Congresso UAI di Sessa Aurunca, 11-12 settembre 1998)

Introduzione

La cometa 1995 O1 (Hale-Bopp) è senza dubbio da annoverare tra gli eventi astronomici più importanti del secolo. La sua apparizione, eccezionale sotto tutti i punti di vista, è stata seguita con grande assiduità sia a livello professionale che amatoriale. È infatti assai raro che una cometa si mostri così attiva già a grande distanza dal Sole, ed è ancora più straordinario il fatto che rimanga visibile ad occhio nudo per diversi mesi e per alcuni anni anche con modesti telescopi. L'analisi della curva di luce pre-perielica, elaborata da Roberto Haver [1] sulla base di circa 290 stime visuali, tutte effettuate da osservatori italiani,

mostra un andamento sostanzialmente regolare al variare della distanza Sole-Cometa (r), in contrasto con quanto avviene per la maggior parte delle comete che hanno invece una pendenza della curva di luce variabile nel tempo. In realtà si notano anche nella Hale-Bopp alcune lente oscillazioni nella curva di luce che tuttavia non sembrano influenzare l'andamento medio, sostanzialmente costante [1, 2].

A questo si aggiunge la particolare ricchezza di strutture nella chioma e nella parte iniziale della coda, con una varietà di dettagli raramente osservata su altre comete. Tutti ricorderemo il curioso aspetto a raggiera, definito "a porcospino" (fig. 1), gli aloni concentrici nella chioma (fig. 2), l'effetto

Abstract

The complex morphological structure of comet 1995 O1 (Hale Bopp) is analyzed using eight CCD observations made between June 1996 and February 1997. Some simulations based on the fountain model were performed looking for a key of interpretation for the different features. It appears that the characteristic "porcupine" aspect, the halos in the coma and the dark shadow in the tail can be related and are probably different aspect of the same kind of dust features observed under different angles. For the large part of the apparition the comet was observed face-on and this explains the stationary "porcupine" aspects shown in 1996. It appears that the morphological changes are quite sensitive to the variation of the angle between the cometary orbit plane and the plane of the sky, and this suggests that most features lies close to the orbital plane of the comet. Some preliminary hypothesis about the orientation of the jets and the rotation of the nucleus are done.

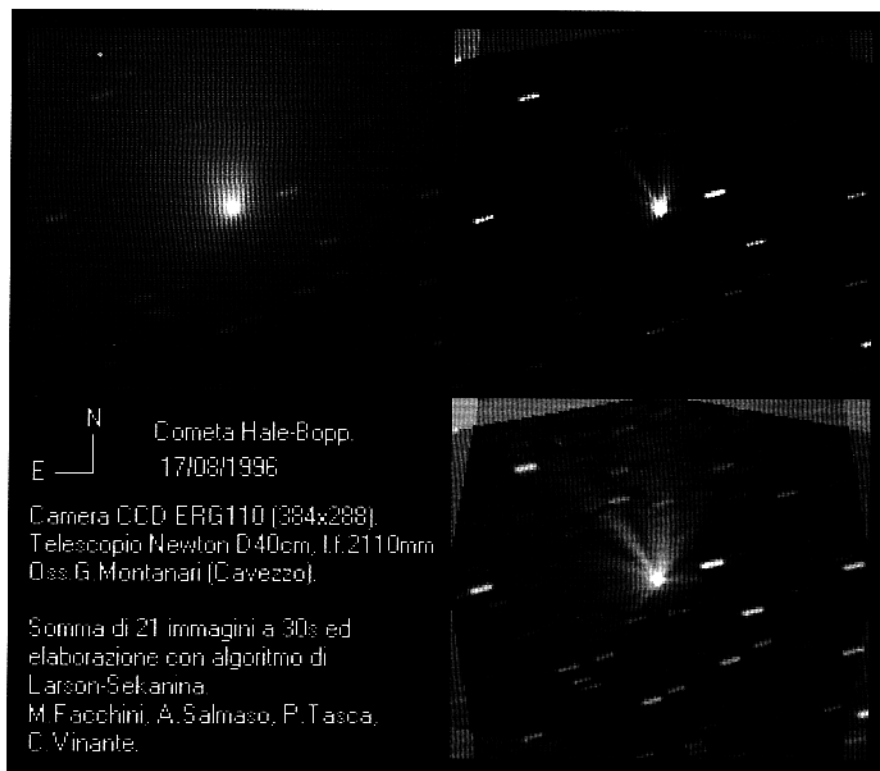


Fig. 1. Immagine CCD, e successive elaborazioni (effettuate dagli autori) della Hale-Bopp presa il 17 agosto 1996 con il Newton da 400 mm dell'Osservatorio G. Montanari di Cavezzo (MO).

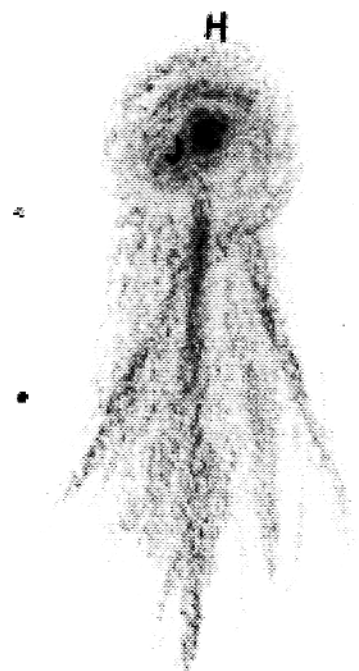


Fig. 2. Gli aloni in espansione della cometa Hale Bopp disegnati da Massimo Cicognani con un telescopio da 41 cm; ben visibile anche la cosiddetta zona d'ombra nella parte iniziale della coda.

N. Data	Delta (U.A.)	R (U.A.)	Ps	V	S	F	Osserv.
1 9.01/06/1996	3.257	4.151	249.1	185.9	82.7	7	(1)
2 6.94/07/1996	2.855	3.855	158.4	174.2	91.0	3	(2)
3 13.95/07/1996	2.798	3.779	130.2	170.9	93.4	5	(1)
4 17.89/08/1996	2.760	3.394	100.8	157.6	104.4	15	(3)
5 8.84/11/1996	3.040	2.420	68.2	153.7	105.6	16	(4)
6 17.75/12/1996	2.758	1.934	20.5	166.1	95.8	13	(4)
7 15.22/01/1997	2.324	1.574	340.8	185.0	84.7	19	(5)
8 08.22/02/1997	1.862	1.283	326.0	207.4	71.4	30	(5)

N. numero progressivo

Data – data dell'osservazione (giorno.decimali di giorno/mese/anno)

Delta – distanza Terra-cometa in Unità Astronomiche

R – distanza Sole-cometa in Unità Astronomiche

V – angolo di posizione della semiretta opposta al vettore velocità proiettato sul piano del cielo

S – angolo formato tra il piano orbitale e il piano del cielo

F – angolo di fase (Terra-cometa-Sole)

Nota: per ulteriori dettagli sugli angoli in oggetto vedi bibl. [3]

Osservatori:

(1): Angelo Salmaso, Paolo Tasca, Carlo Vinante

(2): Angelo Salmaso, Giannantonio Milani, Paolo Tasca, Carlo Vinante

(3): Mauro Facchini, Angelo Salmaso, Paolo Tasca, Carlo Vinante

(4): Mario Dho

(5): Giannantonio Milani

Tab. 1. Parametri geometrici relativi alle osservazioni.

d'ombra nella coda (fig. 3), che si sono susseguiti con il passare dei mesi.

Uno degli aspetti sorprendenti di questa cometa è stata proprio la sua lenta ma costante variazione morfologica, che riflette apparentemente una evoluzione piuttosto complessa. L'analisi delle immagini raccolte in questo lavoro sembra tuttavia suggerire la possibilità che le varietà morfologiche mostrate siano riconducibili ad

un'unica tipologia di struttura, relativamente stabile nel tempo ed osservata sotto diverse condizioni geometriche. Al di là delle variazioni legate all'aumento della produzione di gas e polveri con l'approssimarsi del passaggio al perielio, sembra infatti che la Hale-Bopp sia stata caratterizzata da una sostanziale stabilità nella sua conformazione di base; in questo le grandi dimensioni del nucleo (stimate tra i

27 e i 42 km di diametro [4]) potrebbero rappresentare certamente un fattore determinante. È infatti ragionevole supporre che un nucleo di grande massa e dimensioni possa essere animato da un moto di rotazione intorno al proprio asse piuttosto stabile.

Le condizioni geometriche dell'apparizione

Da un punto di vista geometrico l'apparizione della Hale Bopp, pur non particolarmente favorevole (la distanza Terra-cometa si è mantenuta sempre relativamente elevata), si è presentata ugualmente propizia sotto diversi aspetti. L'elevata inclinazione dell'orbita, con il passaggio al perielio ben posizionato per essere seguito dal nostro emisfero, e il lungo periodo di osservazione, hanno consentito di avere una visione abbastanza completa dell'oggetto sotto diverse angolazioni. In fig. 4 sono rappresentate le orbite della cometa e della Terra, in alto con linea di vista all'incirca ortogonale al piano orbitale della cometa e giacente sull'eclittica, in basso con linea di vista perpendicolare all'eclittica ed osservando l'orbita cometaria di taglio. Sono indicate le posizioni della Hale-Bopp e della Terra relative alle date di osservazione, identificate con un numero progressivo; la stessa numerazione è riportata in tab. 1, dove sono indicati alcuni parametri geometrici relativi alle singole osservazioni. Come considerazione di carattere generale possiamo notare innanzitutto che la cometa, essendo stata scoperta a grande distanza dal Sole, è stata vi-

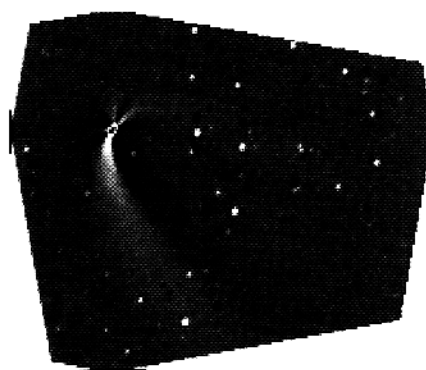


Fig. 3. Una elaborazione di una ripresa effettuata dall'autore il 28 febbraio 1997 con un telescopio da 20 cm f/4 e filtro RG695 evidenzia l'ampia zona oscura nella parte iniziale della coda; camera CCD Seti245, elaborazione con Elabccd.

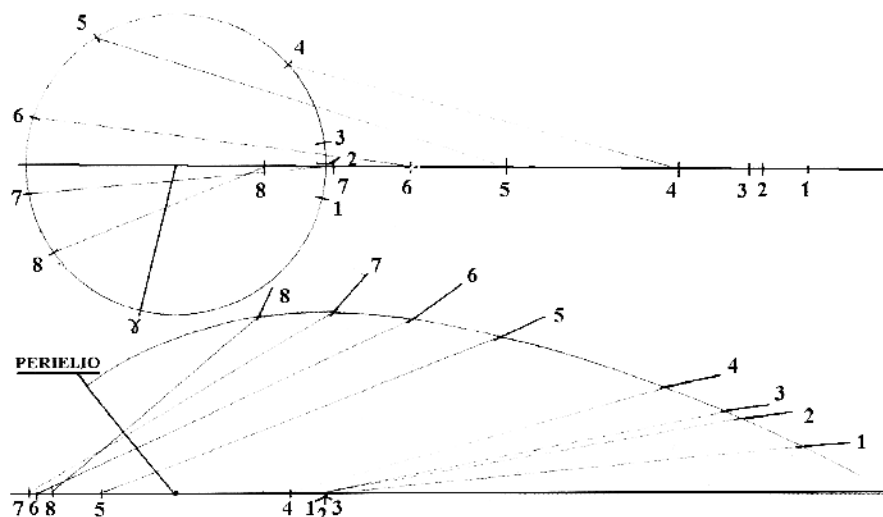


Fig. 4. Le orbite della cometa e della Terra con segnate le posizioni relative alle date delle osservazioni (vedi testo e tab. 1).

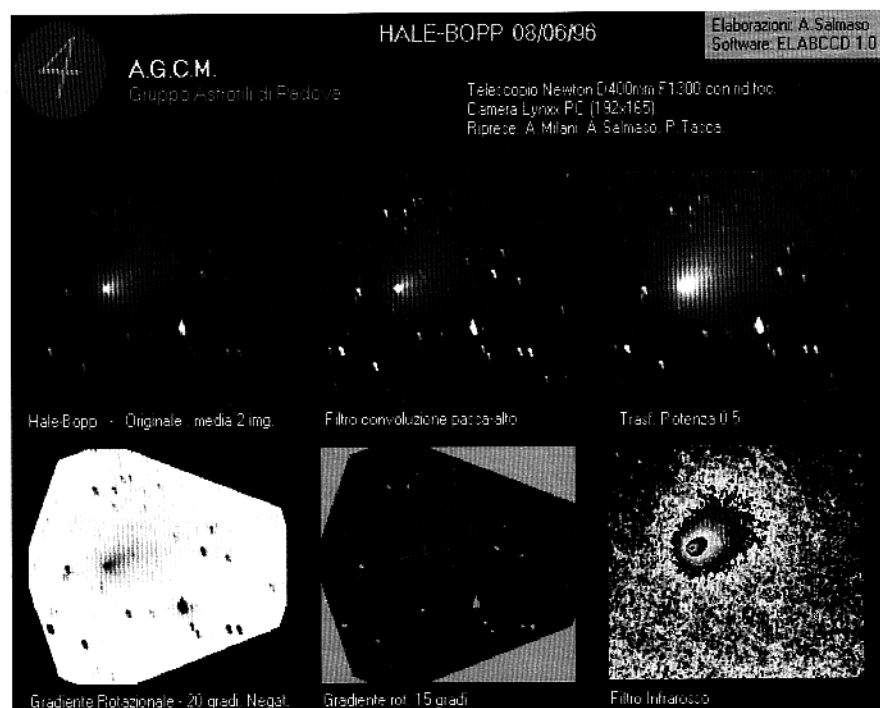


Fig. 5. Immagine CCD, e successive elaborazioni (effettuate dagli autori) della Hale-Bopp presa l'8 giugno 1996 con il Newton da 400 mm del Gruppo Astrofili di Padova.

sta frontalmente per la maggior parte dell'apparizione, con una situazione quindi poco favorevole all'osservazione della coda. Condizioni geometriche relativamente favorevoli per la coda si sono avute, per un periodo limitato, solo intorno a metà marzo del 1997, poco prima del passaggio al perielio [5, 6]. Per quanto riguarda il periodo preso in considerazione in questa analisi si nota in generale che le condizioni geometriche hanno su-

bito variazioni modeste, e hanno mostrato in particolare una notevole stabilità tra agosto e dicembre 1996: infatti mentre la cometa avanzava verso il perielio, la Terra arretrava lungo la sua orbita (v. fig. 4). Proprio questo periodo è stato caratterizzato dall'apparizione di getti stazionari (aspetto a "porcospino"). L'aspetto "stazionario" è quindi coinciso con condizioni geometriche di osservazione pressoché costanti.



Fig. 6. Immagine CCD, e successive elaborazioni (effettuate dagli autori) della Hale-Bopp presa il 6 luglio 1996 con il Newton da 400 mm del Gruppo Astrofili di Padova.

Le osservazioni

Le figure dalla 5 alla 11 riguardano le singole osservazioni elaborate per evidenziare le diverse strutture morfologiche. Le elaborazioni, ad eccezione dell'immagine di Mario Dho (fig. 8), sono state effettuate dagli stessi autori. Scorrendo le immagini si vede come l'aspetto della chioma sia andato gradualmente modificandosi con il passare del tempo, mostrando strutture via via sempre più complesse. Di grande interesse si sono rivelate le immagini ottenute in prossimità del passaggio della Terra sul piano orbitale della cometa (inizio di luglio e di gennaio). In particolare quella relativa al 6 luglio (osservazione n. 2, fig. 6) è stata ottenuta in condizioni geometriche molto particolari: se si osservano infatti i valori della tab. 1 si nota che l'angolo di fase e l'angolo S hanno valori rispettivamente di 3° e 91° . In questa circostanza quindi la cometa è stata vista quasi esattamente di fronte trovandosi la Terra appena 1° al di fuori del piano orbitale cometario (S prossimo a 90°) e con un angolo di fase molto piccolo (F prossimo a zero). La Terra giaceva quindi quasi esattamente sul raggio vettore (congiungente Sole-cometa).

Per cercare di interpretare l'aspetto della cometa possiamo avanzare alcune ipotesi: se immaginiamo che l'emisfero diurno del nucleo sia uniformemente attivo, osservando la cometa sotto questa particolare prospettiva dovremmo aspettarci di vedere una chioma regolare e di forma pressoché circolare. Quello che appare invece è una chioma dall'aspetto completamente asimmetrico, caratterizzata da una emissione localizzata e da un getto particolarmente intenso verso nord. Misurando l'angolo di posizione di queste strutture si può dedurre che molto probabilmente si tratta di particolari della chioma e non della coda. Ciò che osserviamo ci permette quindi di avere delle preziose indicazioni sulla direzione di emissione dei materiali ed entro certi limiti anche sulla dislocazione delle aree attive. Nell'immagine seguente (fig. 7) le cose cambiano leggermente. Qui l'unico angolo che ha mostrato una variazione sensibile, sia pure molto contenuta, è l'angolo S (v. tab. 1); ora la chioma mostra ancora più chiaramente la presenza di due getti quasi opposti tra loro, di cui uno molto intenso. L'aspetto poi muta rapidamente stabilizzandosi tra

agosto e dicembre (figg. 1, 8) con la comparsa dei raggi stazionari. Come già detto in precedenza in questo periodo le condizioni geometriche sono rimaste praticamente costanti. Appare quindi lecito supporre che i cambiamenti di forma e struttura siano stati provocati più dal variare delle condizioni prospettiche (soprattutto dalla variazione dell'angolo S) che non da una evoluzione della cometa.

Questa ipotesi trova una ulteriore conferma nelle immagini ottenute a metà gennaio del '97 (fig. 9) quando, circa due settimane dopo il passaggio della Terra sul piano orbitale della cometa, ritroviamo un aspetto del tutto analogo a quello già osservato sei mesi prima, all'inizio di luglio (fig. 7). La cosa non appare casuale ed è plausibile che le strutture osservate (in particolare il forte getto verso nord) siano sostanzialmente le stesse.

Avvicinandosi al perielio le condizioni geometriche tornano a cambiare velocemente e infatti ricompare nuovamente la struttura a getti, diversa da prima perché la prospettiva è cambiata, ma il numero dei raggi e la loro disposizione reciproca è ancora vagamente riconoscibile. Nello stesso periodo abbiamo la comparsa degli aloni nella parte interna della chioma (fig. 11). Tuttavia è ragionevole supporre che questi fossero presenti anche in precedenza ma non risultassero osservabili solamente per le sfavorevoli condizioni prospettiche. Tra gli aspetti peculiari emersi verso il perielio è anche da segnalare la grande zona d'ombra nella coda, talvolta chiamata impropriamente "ombra del nucleo", che analizzeremo in seguito.

La particolare morfologia osservata permette di avanzare, sia pure con cautela, alcune ipotesi relative alla rotazione del nucleo. L'aspetto a due raggi opposti rilevato all'inizio di luglio del '96 e a metà gennaio del '97 (vicino alle date del passaggio della Terra sul piano orbitale della cometa) fa pensare che le aree attive possano essere localizzate in prossimità dell'equatore del nucleo e che l'asse di rotazione non si discosti di molto dalla perpendicolare al piano dell'orbita. Infatti nell'immagine del 6 luglio '96 i getti sono orientati approssimativamente in direzione nord-sud, e il 15 gennaio '97 i getti simmetrici mostrano un orientamento analogo pur con una modesta ma sensibile inclinazione rispetto alla direzione nord-sud (ricordiamo a tale proposito che il piano orbitale

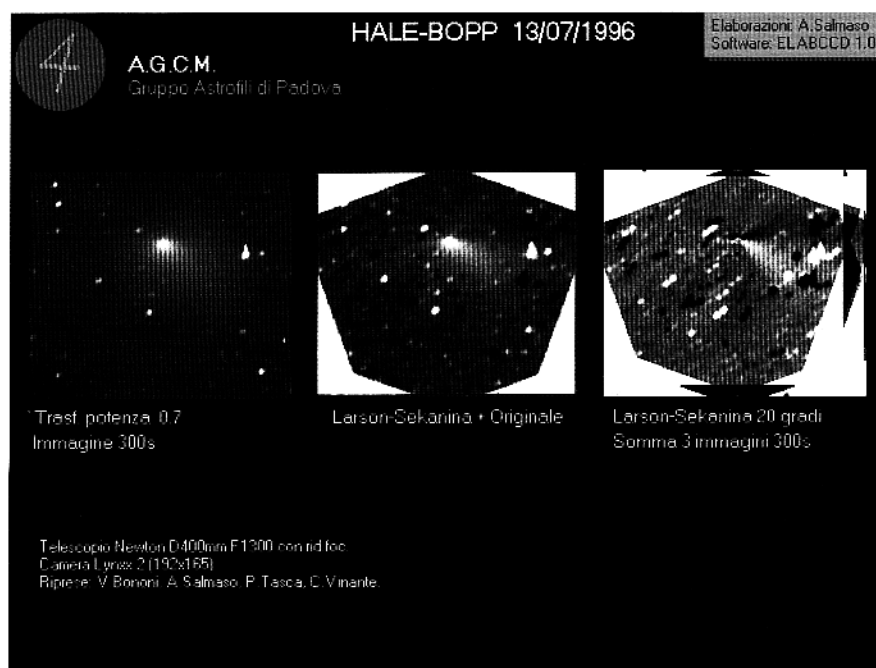


Fig. 7. Immagine CCD, e successive elaborazioni (effettuate dagli autori) della Hale-Bopp presa il 13 luglio 1996 con il Newton da 400 mm del Gruppo Astrofili di Padova.

della cometa è inclinato di 90° rispetto all'eclittica). Il confronto tra le due osservazioni non può essere però rigoroso essendo leggermente diverse le condizioni geometriche.

Osservando gli aloni concentrici intorno al perielio si ha inoltre l'impressione che in quel periodo l'asse di rotazione fosse rivolto grosso modo verso la Terra. Potrebbe quindi esserci una lenta variazione nell'inclinazione dell'asse di rotazione, anche se ovviamente una simile ipotesi richiede una verifica molto più accurata.

Le simulazioni al computer

Per cercare di trovare una chiave interpretativa delle diverse strutture osservate sono state utilizzate anche delle simulazioni al computer. Il modello adottato per generare le simulazioni è quello classico a fontana, dove si suppone che il materiale (nel nostro caso le polveri) venga emesso dall'emisfero diurno del nucleo con una certa velocità iniziale e che venga respinto all'indietro dall'accelerazione impressa dalla radiazione solare (pressione di



Fig. 8. Immagine CCD di Mario Dho (elaborazione di G. Milani con Elabccd).

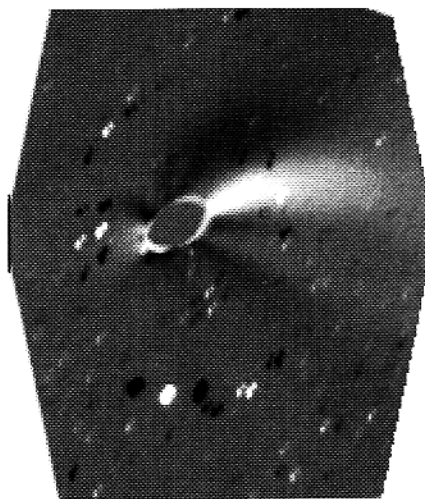


Fig. 9. La cometa ripresa dall'autore il 15 gennaio 1997; Newton da 20 cm f/4, CCD Seti 245, elaborazione con Elabccd. Da notare la somiglianza di aspetto con l'immagine ottenuta il 13 luglio 1996 (fig. 7). Vedi testo.

radiazione [8]). Le equazioni sono quelle del moto uniformemente accelerato e quindi il modello risulta molto semplice dal punto di vista matematico. È però molto limitato per il

fatto che viene completamente ignorato il moto della cometa lungo la sua orbita. Inoltre il metodo è applicabile solo alle polveri, e non al gas, ma d'altra parte la componente polverosa nella Hale Bopp è apparsa dominante. Si suppone ovviamente per semplicità che le polveri non subiscano alcuna evoluzione (fenomeni ad esempio di frammentazione o evaporazione).

La velocità iniziale di emissione è stata assunta essere di 0,5 km/s; tale valore, in accordo con la formula ricavata da Whipple [7], è stato confrontato, a livello indicativo, con il valore dedotto da alcune misure relative agli aloni ed è stato recentemente confermato indipendentemente da altri autori [8]. Per l'accelerazione impressa dalla radiazione solare è stato adottato un valore empirico scelto in modo da generare strutture analoghe a quelle osservate. Lo scopo delle simulazioni d'altra parte non è quello di riprodurre in modo rigoroso le strutture osservate ma solo di riprodurre artificialmente una cometa "tipo Hale-Bopp" e generare diverse strutture conside-

randole sotto diverse prospettive.

Le numerose semplificazioni adottate consentono di fatto un uso molto ristretto del nostro modello, e il fatto che permetta di generare getti molto simili a quelli della Hale-Bopp è da considerarsi del tutto fortuito; se l'inclinazione dell'asse di rotazione del nucleo della cometa o la dislocazione delle aree attive fosse stata diversa il confronto avrebbe richiesto un modello molto più complesso.

Ipotizzando un asse di rotazione perpendicolare al piano orbitale e una singola area attiva puntiforme posta sull'equatore, o in prossimità di esso, è molto semplice, ponendo in rotazione il nucleo, generare degli aloni in espansione del tutto simili a quelli osservati sulla Hale-Bopp (fig. 12). In pratica gli aloni altro non sono che delle spirali interrotte; avremmo infatti una spirale completa se l'emissione dall'area attiva fosse continua, ma l'emissione avviene invece solo quando l'area è esposta alla radiazione solare (dall'emisfero diurno del nucleo). Variando l'angolo di fase (an-



Fig. 10. I caratteristici aloni della chioma della Hale Bopp, in queste elaborazioni ottenute da una ripresa CCD effettuata il 30 marzo 1997 con il Newton da 150 mm del Gruppo Astrofili di Padova.

golo osservatore-cometa-Sole) è possibile verificare come la visibilità degli aloni peggiori al diminuire dell'angolo di fase.

Si nota anche che con angoli di fase piccoli (come di fatto si è verificato per gran parte del periodo coperto dalle osservazioni) sia possibile generare getti simmetrici stazionari rettilinei o leggermente incurvati, abbastanza simili a quelli che hanno determinato il caratteristico aspetto "a porcospino". Questo aspetto d'altra parte viene meglio approssimato inserendo nel modello più aree attive puntiformi dislocate a latitudini leggermente diverse e sempre osservando con angoli di fase molto piccoli. Sotto questo aspetto l'immagine del 24 novembre 1996 di Rolando Ligustri (fig. 13) risulta abbastanza eloquente, suggerendo la possibilità dell'esistenza di tre aree attive (due delle quali non giacenti esattamente sull'equatore del nucleo) responsabili dei due ventagli laterali e del getto centrale.

Anche la zona d'ombra nella coda risulta in buon accordo con lo scenario descritto fino ad ora. Infatti, sempre ricorrendo a simulazioni, è possibile verificare come, ipotizzando un nucleo caratterizzato da una attività diffusa sull'emisfero diurno, non sia possibile osservare un netto effetto d'ombra ma al più un leggero aumento di luminosità verso i margini esterni della parte iniziale della coda di polvere (figg. 14 e 15). Se invece si suppone che il nucleo ruoti su di un asse perpendicolare al piano dell'orbita e che sia dominato da una singola area attiva, la zona d'ombra appare ben netta ed evidente, soprattutto sotto particolari condizioni prospettiche. Quindi questa particolare morfologia non ha nulla a che vedere con reali effetti d'ombra, ma piuttosto è collegata a una emissione delle polveri da aree attive ristrette.

Conclusione

L'analisi morfologica e geometrica di alcune osservazioni effettuate tra il 9 giugno 1996 e il 20 febbraio 1997 ha permesso di comprendere almeno in parte i meccanismi che hanno concorso a generare le particolari morfologie osservate sulla Hale Bopp. Riteniamo interessante il fatto che tutte le strutture possano trovare un'unica chiave di interpretazione e cioè che siano spiegabili ipotizzando un nucleo con po-

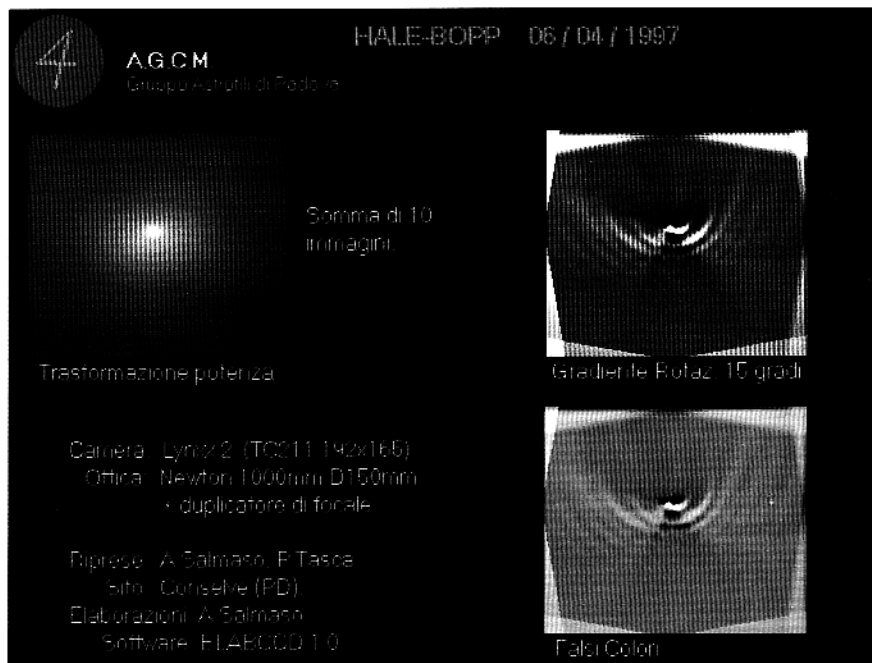


Fig. 11. La comparsa degli aloni nella parte interna della chioma. Elaborazioni ottenute da una ripresa CCD realizzata il 6 aprile 1997 con il Newton da 150 mm del Gruppo Astrofili di Padova.

che aree attive (di cui una apparentemente dominante) localizzate in prossimità dell'equatore e un asse di rotazione non eccessivamente inclinato rispetto alla direzione perpendicolare al piano dell'orbita. La cometa sembra anche essere stata caratterizzata da un'evoluzione molto lenta e i mutamenti nelle strutture sono apparsi sensibili soprattutto al cambiamento dell'angolo δ (angolo tra piano orbitale cometario e piano del cielo), il che fa supporre che i getti si siano sviluppati prevalentemente in prossimità del piano orbitale della cometa.

I risultati ottenuti tuttavia vanno ancora considerati con una certa cautela, essendo basati su di un campione ristretto di dati e su di un intervallo temporale limitato. Siamo, infatti, ancora lontani dal poter costruire un modello in grado di spiegare in modo rigoroso tutti i fenomeni riscontrati. Ulteriori indagini, estese ad un periodo di tempo più ampio, potrebbero verificare quanto trovato fino ad ora. Di enorme importanza potranno essere le osservazioni post-perieliche effettuate nell'emisfero australe.

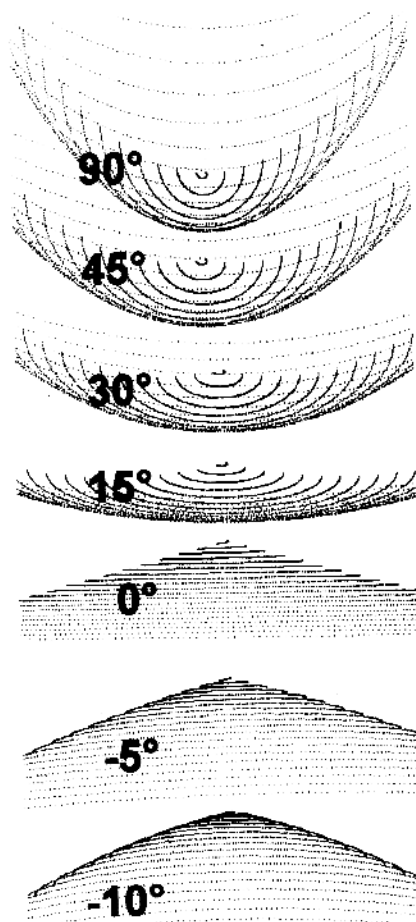


Fig. 12. Una ricostruzione delle variazioni di aspetto di aloni in espansione, simili a quelli della Hale-Bopp, in funzione delle condizioni prospettiche (angolo di fase). Nel nostro caso la rotazione del nucleo avviene su di un asse perpendicolare al piano orbitale e rivolto verso l'osservatore con angolo di fase uguale a 90° (cometa osservata lateralmente). L'area attiva si trova prossima all'equatore del nucleo, ad una latitudine di 15° sud. I valori dell'angolo di fase assunti come negativi (in basso) indicano che rispetto alla prima immagine la prospettiva è cambiata di oltre 90° . Da notare come con il variare dell'angolo la visibilità degli aloni peggiori fino a lasciare il posto a due getti simmetrici.

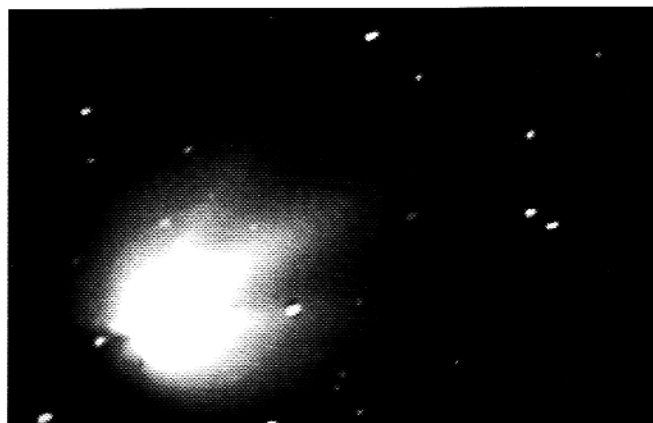


Fig. 13. La Hale Bopp il 28/11/96 ripresa da Rolando Ligustri; somma di 4 pose da 60 sec con tel. 300 mm f/6,3. L'immagine sembra suggerire la presenza di tre aree attive che generano due ventagli laterali e due raggi opposti centrali.

Ringraziamenti

Un caloroso ringraziamento va a tutti coloro, anche se non espressamente citati, che hanno inviato le loro osservazioni alla Sezione Comete UAI, tutte estremamente utili anche in questa fase preliminare di analisi. Infatti se da un lato, per comodità e semplicità, sono state analizzate solo alcune osservazioni CCD, da un altro aver avuto sotto mano un gran numero di osservazioni di vario genere (visuali, fotografiche e CCD) ha avuto un'importanza fondamentale. È stato infatti possibile avere una panoramica particolarmente ricca e dettagliata degli aspetti morfologici mostrati dalla cometa nel corso della sua apparizione. Analizzare singolarmente in modo particolareggiato tutte queste osservazioni sarebbe stato però problematico, oltre che molto dispendioso in termini di tempo, ed è questo uno dei motivi che hanno spinto a studiare approfonditamente solo poche immagini. D'altra parte, proprio la disponibilità di molti dati ha permesso di verificare che la lentezza nei cambiamenti morfologici della Hale Bopp era reale, permettendo così di utilizzare un campione ristretto di dati.

Bibliografia

- [1]. Haver, R. *Astronomia*, 3, 10-12 (2000).
- [2]. Sello, S. *Comunicazioni private* (1998-1999).
- [3]. Bernasconi, A. *Pagine Sparse di Astronomia Cometeria* (Biroma, Galliera V., 1999).
- [4]. Weaver, H.A. et al., *Science*, 275, 1900-1904 (1997).
- [5]. Milani, G. *Astronomia*, 5/6, 28-32 (1996).
- [6]. Milani, G. *L'Astronomia*, 170, 35-41 (1996).
- [7]. Whipple, F.L. *Nature*, 273, 134 (1978).
- [8]. Burns, S.M.; Dries, A.D. *Int. Comet Q.*, 20, 107-111 (1998).
- [9]. Massonne, L. in *Comet Halley, investigations, results, interpretation* (Praxis Publ., Chicester, UK, 1994).

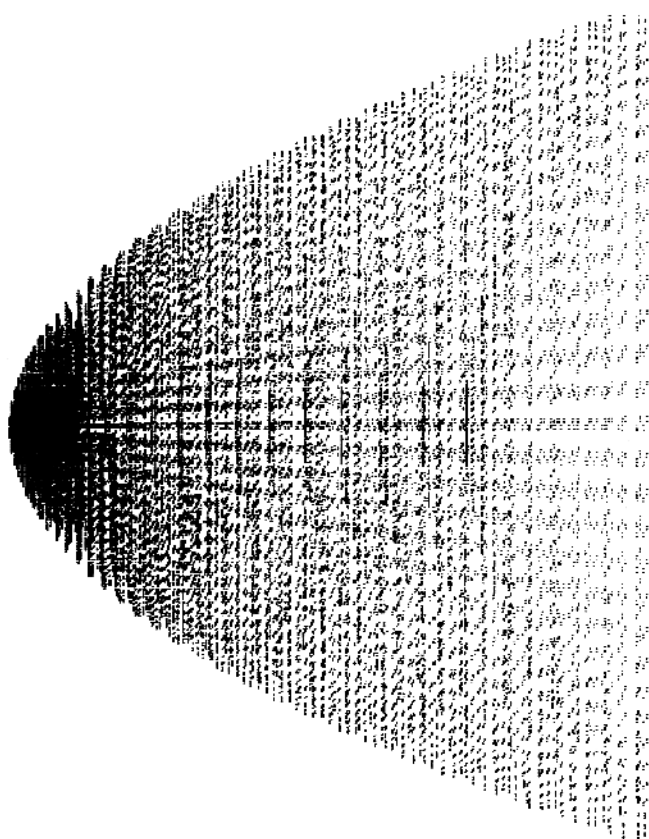


Fig. 14. La simulazione è ottenuta ipotizzando un nucleo attivo su tutto l'emisfero diurno. La coda appare in questo caso di aspetto uniforme. Si suppone di osservare con angolo di fase 90° .

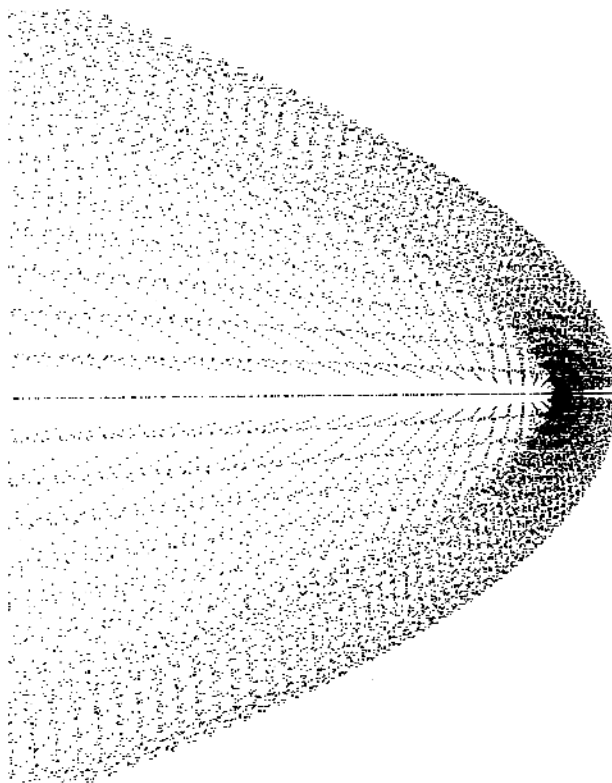


Fig. 15. Un'altra simulazione ottenuta ipotizzando una emissione localizzata in un'area limitata di un nucleo in rotazione. L'effetto d'ombra appare chiaramente. Anche in questo caso, come nel precedente, l'angolo di fase è di 90° .