

# Fotometria di apertura delle chiome cometarie mediante CCD

Giannantonio Milani

Ottobre 2002

## 1 Introduzione

Il presente programma osservativo si propone di effettuare una sorveglianza sistematica di tipo fotometrico di tutte le comete che giungono alla portata degli strumenti equipaggiati con CCD.

La fotometria di apertura applicata allo studio delle chiome cometarie é infatti una tecnica che può fornire dati scientificamente interessanti anche su quegli oggetti, che rappresentano la maggioranza, privi di dettagli evidenti. Nello stesso tempo si é cercato un modo per sfruttare al meglio le potenzialità delle strumentazioni amatoriali giungendo ad un compromesso ragionevole mediante l'uso di una tecnica che garantisca un buono standard qualitativo senza per questo diventare eccessivamente complessa.

Teniamo a puntualizzare che comunque la procedura di analisi richiede un certo tempo ed é quindi necessario programmare in modo adeguato la propria attività osservativa onde evitare di trovarsi in difficoltà poi nell'analisi dei dati. Con questo programma si é voluto coinvolgere gli osservatori nella fase preliminare di elaborazione, e questo non solo per decentrare almeno una parte del lavoro, ma anche per permettere di produrre informazioni già significative a livello scientifico e interessanti anche per il mondo professionale.

Quanto esposto é nato grazie al lavoro di osservazione e sperimentazione condotto tra il 1996 e il 2001 nell'ambito della Sezione Comete dell'U.A.I.<sup>1</sup> dagli osservatori del GOC<sup>2</sup> un gruppo che ha lavorato in stretto contatto prevalentemente mediante scambio di e-mail in prima battuta, ed utilizzando in seguito la mailing list della Sezione Comete.

## 2 Le quantità fotometriche

Uno dei problemi inerenti la fotometria delle chiome cometarie, concepita in modo 'classico' come misura della magnitudine totale della chioma (magnitu-

---

<sup>1</sup>Unione Astrofili Italiani

<sup>2</sup>Gruppo Osservatori Comete

dine integrata), è che risente più o meno pesantemente di effetti strumentali e di cielo ed è alla fine un dato che presenta notevoli limitazioni a livello interpretativo.

Se tuttavia consideriamo le osservazioni visuali la determinazione dalla magnitudine totale ha ancora una sua ragione d'essere in quanto i dati prodotti sono compatibili con quelli storici dei secoli passati. Se invece consideriamo il campo coperto dalle osservazioni CCD la magnitudine determinata con metodiche ispirate all'esperienza visuale permette di sfruttare solo in parte le possibilità offerte dalla tecnologia digitale.

A livello professionale la fotometria cometaria è mirata soprattutto a determinare la quantità di gas e polveri prodotte dal nucleo e alla determinazione delle dimensioni e proprietà del nucleo stesso. Questo sulle comete attive viene effettuato utilizzando filtri a banda molto stretta, centrati su particolari emissioni o su regioni nelle quali è presente quasi esclusivamente luce riflessa dalle polveri, ma tali filtri risultano generalmente poco convenienti per strumentazioni amatoriali e per cieli non ottimali e le prove effettuate sulle comete più luminose non hanno portato generalmente a risultati soddisfacenti.

Molto più accessibile risulta l'utilizzo di filtri a banda larga (ad es. per le bande BVRI) se non addirittura l'uso di CCD senza filtri previa opportuna calibrazione.

Per quanto concerne lo studio delle polveri viene comunemente utilizzata la quantità  $Af[\rho]$  (in seguito  $Afrho$ ), introdotta da A'Hearn nel 1984. Questa quantità può essere interpretata come la dimensione di un disco di polveri che rifletta una quantità di luce equivalente a quella riflessa complessivamente dalle polveri della chioma cometaria. Le dimensioni sono generalmente espresse in cm o m a seconda della convenienza.

Si passa quindi da una misura di luminosità (magnitudine) ad una misura lineare strettamente collegata alle proprietà chimiche e fisiche della componente polverosa.

L' $Afrho$  viene talvolta utilizzato per stimare la produzione di polveri di una cometa, assumendo come rappresentative della massa totale polveri di densità, dimensione e albedo predefinite. Questo ovviamente richiede alcune assunzioni ad hoc, utilizzando anche valori derivati dall'osservazione di altre comete.

Una ulteriore limitazione è data dal fatto che il valore ottenuto è attendibile solo se la chioma polverosa si accorda con il modello 'stazionario' ad espansione radiale con velocità costante. Nonostante ciò l' $Afrho$  costituisce un dato importante poichè qualunque modello venga utilizzato per lo studio delle polveri deve risultare compatibile con il valore  $Afrho$  osservato. Inoltre questa quantità si presta ad altre verifiche e considerazioni come ad esempio se le polveri si accordano con il modello ad espansione costante e fino a che distanza dal nucleo (cioè fino a dove l'interazione con la pressione di radiazione non è più trascurabile). Ulteriori considerazioni possono

derivare dal confronto dei valori  $A_{frho}$  con altre quantità ottenute con altre tecniche osservative.

Per quanto riguarda le osservazioni amatoriali possiamo riassumere i principali vantaggi offerti dall'utilizzo di questa quantità:

- la determinazione della quantità  $A_{frho}$  non risente di effetti strumentali e dati ottenuti con diverse strumentazioni e sotto varie condizioni geometriche possono essere vantaggiosamente messi a confronto sebbene la condizione ottimale si ottiene mediante l'uso di filtri a banda stretta centrati su regioni dominate dalla luce solare riflessa dalle polveri, o mediante l'analisi di spettri, anche l'uso di filtri a banda larga, se non addirittura l'osservazione in luce integrale, può dare risultati interessanti. Facendo riferimento a comete 'polverose' (tipo Hale-Bopp) osservate senza filtri si ha che la quantità  $A_{frho}$  viene sovrastimata all'incirca del 10%. Le cose possono migliorare con l'uso di filtri anche a banda larga.
- I dati ottenuti rispecchiano meglio eventuali variazioni di attività della cometa e l'uso di filtri standard permette di evidenziare anche variazioni nella produzione di gas (ad es. il filtro V di Johnson è dominato dalla emissione del  $C_2$ ).
- I dati prodotti sono direttamente confrontabili con quelli ricavati dai professionisti.
- La creazione di un archivio dati risulta più semplice e leggibile rispetto ad uno equivalente relativo alle magnitudini.

### 3 Metodica osservativa

La determinazione della quantità  $A_{frho}$  si basa sulla fotometria di apertura mediante finestre di misura di diverse dimensioni tutte centrate sul nucleo. Poiché teoricamente il risultato è indipendente dalle dimensioni della finestra di misura il metodo si presenta particolarmente versatile e permette di utilizzare strumenti di aperture e focali molto eterogenei senza particolari inconvenienti.

La fotometria di apertura non presenta problematiche particolari anche se sulle comete è necessario rispettare alcune norme di base.

Gli osservatori del GOC - Sezione Comete, utilizzano al momento correntemente il programma Astroart<sup>3</sup> che permette effettuare fotometria di apertura con finestra quadrate, il programma osservativo è stato pertanto ottimizzato per l'uso di finestra quadrate e si dà per scontato che tutti usino questo stesso metodo. Nel caso di utilizzo di programmi con finestra circolare contattare il coordinatore del programma.

<sup>3</sup>MSB Software - <http://www.msb-astroart.com>

Le finestre di preferenza devono avere il lato composto da un numero dispari di pixels, questo permette di porre sempre al centro il falso nucleo della cometa. L'apertura di misura minima utilizzabile deve essere compatibile con la risoluzione effettiva delle immagini. Finestre troppo piccole risentono di sfocature, errori di guida, turbolenza atmosferica, e portano a misure errate della quantità  $Afrho$ . L'esposizione deve essere tale da non raggiungere mai il livello di saturazione sia per la cometa che per le stelle di confronto. Se la cometa è debole è opportuno sommare (o mediare se la cometa è luminosa) più immagini centrando sul falso nucleo per migliorare il rapporto segnale/rumore e quindi la precisione delle misure stesse. Le stelle luminose eventualmente sovrapposte alla chioma vanno rimosse ritocando le immagini uniformando la luminosità della chioma a quella delle zone circostanti alla stella. La presenza di stelle molto deboli rispetto alla cometa non incide in modo determinante sulle misure.

I filtri consigliati a livello generale per questo studio sono quelli B, V di Johnson e R, I di Cousins, non escludendo a priori l'uso di filtri a banda stretta quando possibile. Osservazioni effettuate senza filtri vanno riferite alla banda più vicina al picco di sensibilità del CCD (generalmente V o R), la determinazione della banda corrispondente e dell'eventuale correzione aggiuntiva richiede una opportuna calibrazione mediante la ripresa di un campo standard (ad es. l'ammasso aperto M67). Considerato che l'uso di molti filtri è piuttosto laborioso si consiglia di limitarne il numero; i più indicati sono le coppie V, I e V, R. Utilizzando un solo filtro dare la precedenza ai filtri I o R che coprono regioni con poche emissioni gassose e che quindi approssimano meglio il valore reale dell' $Afrho$ .

Di preferenza utilizzare stelle di confronto tratte dai cataloghi Tycho e Hypparcus che danno una buona copertura su tutto il cielo o eventualmente da altri cataloghi di buona precisione (Bright Star Catalog e in generale cataloghi realizzati mediante fotometri fotoelettrici) e che forniscano la magnitudine V e l'indice di colore  $B - V$  (bande di Johnson). Le stelle vanno scelte preferibilmente con indice di colore  $0 < B - V < 1$  ed evitando stelle troppo rosse ( $B - V > 1$ ).

Idealmente utilizzare stelle presenti nello stesso campo della cometa. Se questo non è possibile riprendere una stella nota nei pressi della cometa possibilmente a non più di 1 grado di distanza per minimizzare le eventuali differenze di cielo.

Il tempo di posa delle stelle di confronto dovrebbe essere almeno di 5-10 secondi. Nel caso di pose molto brevi la scintillazione atmosferica diviene un disturbo importante, è quindi consigliato mediare 5-10 riprese. Verificare anche che non vi siano anticipi di apertura e chiusura nell'otturatore (se meccanico) che potrebbero introdurre errori sistematici nelle misure.

Le immagini devono essere pre-trattate prima delle misure, cioè deve

essere sottratto il dark frame<sup>4</sup> corrispondente e devono essere divise per il flat field<sup>5</sup>. Si dà per scontato che gli osservatori abbiano una certa confidenza con questa procedura. Le immagini di dark frame e flat field devono preferibilmente essere la media di più riprese.

## 4 Programma di analisi dei dati

Per semplificare la procedura di analisi é stato compilato un semplice programma che consente di ricavare le misure delle quantità  $A_{frho}$  partendo dai conteggi ADU misurato mediante la fotometria di apertura. I dati richiesti sono i seguenti:

- distanza Terra-Cometa in U.A. per l'istante dell'osservazione (N.B. utilizzare elementi orbitali validi per l'epoca considerata)
- distanza Sole-Cometa in U.A. per l'istante dell'osservazione (N.B come sopra)
- dimensioni x e y di un singolo pixel del CCD espresse in secondi d'arco
- magnitudine V della stella di confronto
- indice di colore B-V della stella di confronto

dopo il calcolo delle magnitudini R e I per la stella di confronto si richiede:

- selezione della banda fotometrica (B,V,R,I)
- conteggi ADU relativi alla stella di confronto (sottratto il contributo del fondo cielo)
- tempo di esposizione relativo alla stella
- tempo di esposizione relativo alla cometa (se uguali per stella e cometa, per brevità, si può indicare 1 per tutti e due).
- Dimensioni della finestra in pixels (base)
- Conteggi ADU relativi alla cometa (sottratto il contributo del fondo cielo).

Il programma restituisce i seguenti valori:

- magnitudine della cometa relativa alla finestra di misura considerata.

---

<sup>4</sup>Immagine della corrente di buio ottenuta ad otturatore chiuso con stesso tempo di posa e alla stessa temperatura

<sup>5</sup>Immagine di un campo uniformemente illuminato al quale e' stato sottratto il suo dark frame

- Raggio in km della regione di chioma considerata (raggio equivalente alla finestra quadrata di misura tenendo conto del gradiente di luminosità della chioma)
- Quantità Afrho misurata, espressa in cm
- Errore indicativo sulla quantità Afrho per un errore ipotetico pari a 0,05 nel calcolo della magnitudine.

## 5 Note

### 5.1 Note sulla quantità AFRHO

La determinazione della quantità Afrho viene effettuata mediante la misura del rapporto tra il flusso luminoso ricevuto dalla cometa e il flusso solare mediante la formula:

$$Af_{[\rho]} = \left( \frac{2DR}{\rho} \right)^2 \left( \frac{Fc}{Fs} \right) \rho$$

Dove

- A é l'albedo
- f il fattore di riempimento, cioè quanto i grani di polvere riempiono il campo di vista
- $\rho$  é il raggio della chioma considerata nella misura, solitamente espresso in cm
- D é la distanza geocentrica Terra-Cometa espresso in cm
- R la distanza eliocentrica in Unità Astronomiche
- Fc il flusso luminoso osservato per la cometa
- Fs il flusso solare a 1 U.A.

Il fattore di riempimento (f) é di norma inferiore a 1 in quanto i grani non riempiono mai completamente il campo di vista; solo nel caso della Hale-Bopp la regione più interna della chioma é risultata completamente opaca a causa della elevata densità delle polveri (f=1).

Alcuni autori utilizzano l'albedo geometrico  $A(\Phi)p$ , che definisce il rapporto tra radiazione incidente riflessa perpendicolarmente alla superficie e intensità della radiazione incidente. In questo caso il valore della quantità Afrho risulta 4 volte inferiore rispetto all'albedo indicato nella formula originale di A'Hearn, che considera invece la radiazione complessiva riflessa da un corpo nello spazio (albedo definito da George P. Bond nel 1861).

## 5.2 Note sulle magnitudini delle stelle di confronto

Per poter disporre di una fonte omogenea e che garantisca una buona copertura su tutto il cielo si é scelto di utilizzare come fonte principale i cataloghi Tycho e Hypparcus. Partendo dalla magnitudine V e dall'indice di colore B-V vengono estrapolate le magnitudini R e I mediante polinomi di sesto grado ricavati dalla Bright Northern Standard list compilata da Brian Skiff e che rappresenta una delle migliori fonti di magnitudini in più colori di stelle luminose per l'emisfero Nord.

La precisione del metodo garantisce mediamente una buona precisione

## 6 Ringraziamenti

Nell'ambito degli osservatori attivi riconoscimenti particolari vanno a Rolando Ligustri del C.A.S.T<sup>6</sup> e a Giovanni Sostero dell' A.F.A.M.<sup>7</sup> per la loro notevole mole di osservazioni condotte in modo sistematico che hanno permesso di testare e migliorare le tecniche osservative e di riduzione dati.

Allo sviluppo del programma hanno collaborato il Dr. Marco Fulle<sup>8</sup>, il Dr. Gyula Szabo<sup>9</sup> e il Dr. Mauro Barbieri<sup>10</sup>.

Un ringraziamento va anche a Herman Mikuz<sup>11</sup> per le preziose indicazioni nelle prime fasi di sperimentazione di fotometria cometaria.

Conversione in L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub> e PDF a cura di Carlo Vinante<sup>12</sup>

---

<sup>6</sup>Circolo Astrofili Talmassons - Udine

<sup>7</sup>Associazione Friulana Astronomia e Metereologia, Osservatorio di Remanzacco - Udine

<sup>8</sup>Osservatorio Astronomico di Trieste

<sup>9</sup>Dipartimento di Fisica e Osservatorio di Szeged, Ungheria

<sup>10</sup>C.I.S.A.S. Centro Interdipartimentale Studi ed Attivit Spaziali "G.Colombo" - Università di Padova

<sup>11</sup>Osservatorio di Crni Vrh, Lubiana - Slovenia

<sup>12</sup>Università di Padova