

C.O.D.A.S.
Centro Osservazione e Divulgazione Astronomica Siracusa

www.codas.it

NGC 650/1



Diego Barucco

© Copyright 2006¹

¹ Documento protetto da diritti d'autore contro la modifica. Questa è una versione stampabile. L'uso del materiale documentario e fotografico di questo lavoro comporta l'obbligo di citazione dello stesso con il nome dell'autore e dell'associazione che ne ha autorizzato la pubblicazione on-line. Per ulteriori informazioni scrivere a diego.barucco1@virgilio.it

Dati principali

NGC 650/1

PNG 130.9-10.5

PK 130-10.1

“Little Dumbbell”

RA: 01h 42m 18,1s

DE: +51° 34' 16”

Magnitudine: 10,1

Magnitudine H β : 11,70

Luminosità superficiale: 12,18

Dimensione - 163”X107”

Stella centrale magnitudine V: 17,48

Descrizione NGC: vB, p of D neb

Uranometria: 035

Note storiche: Scoperta da Pierre Méchain il 5 settembre 1780.

Altre denominazioni: Messier 76, Herschel I-193, GC 385/86, Cork Nebula.

Distanza: 739 pc²; 1200 kpc³

Raggio: 0,248 pc

Classe: 3(6)

Classe Bar: BTPNa

² Cahn *et al.* (1992)

³ Koornneef & Pottasch (1998)

Introduzione

Il catalogo di Messier è certamente la più conosciuta raccolta di oggetti galattici ed extragalattici, alla quale appartengono fra i più brillanti e più begli oggetti dell'intero cielo boreale. Nella moltitudine di galassie e di ammassi stellari descritti nel catalogo, trovano posto quattro importanti nebulose planetarie, fra queste M 76, conosciuta anche come NGC 650/1, è degna rappresentate di una categoria di nebulose planetarie classificate come nebulose bipolari.

NGC 650/1 è una ben nota nebulosa collocata nella costellazione del Perseo; ha una magnitudine di 10,1 e una luminosità superficiale di 11,7 che la portano ad essere sufficientemente luminosa anche per piccoli telescopi amatoriali, inoltre le buone dimensioni apparenti offrono poche difficoltà per coloro che hanno intenzione di ottenere una fotografia chimica o digitale. Nel visuale l'uso del filtro OIII offre una buona reazione globale sintomo di un alto grado di eccitazione dei gas.

In fotografia la nebulosa presenta un aspetto bipolare per la presenza di due lobi polari di forma ellittica, mentre in foto professionali, si evidenziano anche due lobi esterni conici molto deboli e con bassa ionizzazione. Queste due strutture esterne si trovano disposte lungo l'asse principale della nebulosa e mostrano velocità cinematiche differenti rispetto ai lobi interni.

Dopo una breve introduzione storica nella quale sono riportate le descrizioni visuali dei più celebri astronomi del passato, la trattazione inizierà con argomentazioni di interesse amatoriale, quali l'osservazione visuale e la ripresa digitale. In seguito ci occuperemo delle caratteristiche fisiche studiando la struttura morfologica anche con l'ausilio di dati cinematici che saranno molto utili per un'interpretazione strutturale ma anche sull'origine e l'evoluzione. Un piccolo paragrafo finale riguarderà specificatamente la stella centrale.

Osservazioni storiche

Scoperta da Pierre Méchain il 5 settembre 1780

Messier

1780 - “...nebulosa scoperta dal signor Mèchain il 5 settembre 1780, nel piede destro di Andromeda, molto vicino alla phi; ne ha determinato la posizione confrontandola con la stella h di Perseo e segnala che questa nebulosa non contiene alcuna stella e che è piccola e debole. Il 21 ottobre seguente ho cercato questa nebulosa con il rifrattore acromatico e mi è parso che fosse composta da piccolissime stelline associate a nebulosità; la minima luce per rischiarare i fili del micrometro la faceva sparire. Molto vicina v'è una stella di ottava magnitudine...”.

W. Herschel

1787, 12 Nov. - “Due nebulose chiuse insieme. Ambedue molto brillanti. Distanza 2'. Una è meridionale, l'altra è verso nord. Una è la 76 del Connoissance [Catalogo di Messier]”.

(Sw. 780) - “Due chiuse insieme, le loro nebulosità s'incontrano l'una con l'altra; la distanza dei loro centri è di 1 1/2 o 2' “. [M76 & H I.193].⁴

1811 - Delle doppie nebulose con nebulosità congiunta - “Oltre agli esempi assegnati nell'articolo precedente [Delle Nebulose che sono brillanti in più punti], sulle nebulose che hanno più di un centro di attrazione io do l'elenco seguente di quello che può essere chiamato delle nebulose doppie”. [15 nebulose, inclusa M76 (H I.193)].⁵

⁴ SP2, p. 659 – l'oggetto intero è M 76

⁵ 1811, PT Vol. 1811, p. 226-336; here p. 285

Smyth

1837, Ottobre - *“Una nebulosa perlacea ovale e bianca, quasi a metà tra Gamma Andromedae e Delta Cassiopeiae; vicino al dito del piede di Andromeda, sebbene figura nei confini di Perseus. Allungata a nord e a sud, con due stelle che precedono entro 11s e 50s e due che seguono quasi sullo stesso parallelo, entro 19s e 36s; vicino ad essa vi è una stella duplice registrata come A [tipo spettrale] di 9 [magnitudine], bianca; e B 14, debole. Quando fu scoperta, Méchain la considerò una massa nebbiosa; ma per Messier era un ammasso di stelle compresso; per WH [William Herschel] era una nebulosa irrisolvibile e duplice. Ha un vicinato [stellare] intensamente ricco, e con i suoi compagni fu osservata da vicino [ad alti ingrandimenti] nel mio osservatorio come un indicatore del livello di luminosità durante l'eclisse totale della Luna del 13 ottobre 1837; notevolmente visibile durante l'oscurità, gradualmente si è affievolita con la comparsa della Luna. Mi sono consultato con il Sig. Challis sulla definizione di questa nebulosa [...] nel 1842, e lui mi ha risposto: "Io ho guardato la nebulosa, come Lei desiderava, e ho pensato che avesse un aspetto allungato. Comunque, la determinazione è stata molto dubbia.”.*⁶

J. Herschel

General Catalog: GC 385 e GC 386.

GC 385 = M76.

RA 1h 33m 28.5m, NPD 39d 8' 52.4" (1860.0)⁷

vB; p di Dneb. 2 osservazioni di W. & J. Herschel.

“Molto brillante; nebulosa duplice”.

GC 386 = H I.193.

RA 1h 33m 37.5m, NPD 39d 7' 27.4" (1860.0)

⁶ Ottobre 1837

⁷ Ascensione retta e Distanza Polare Nord

vB; f di Dneb

“Molto brillante; nebulosa duplice”.

Lord Rosse

1866, 5 Nov. – *“...un oggetto meraviglioso, nebulosa a spirale con interessanti dettagli: due brillanti macchie che, secondo Herschel, sono una nebulosa doppia; una terza parte molto più debole precede le due macchie; termina bruscamente sul bordo sud...”*

Huggins⁸

“Ambo le parti di questa nebulosa danno uno spettro gassoso. La più brillante delle tre linee è certamente visibile. La seconda linea probabilmente è anche presente.

Io sospetto uno spettro continuo e debole procedendo verso il bordo di NW 386.”⁹

Dreyer

NGC 650 & NGC 651.

NGC 650 = GC 385; Méchain, M 76.

RA 1h 33m 31m, NPD 39d 8.3' (1860.0)

vB, p of Dneb; = M76

“Molto brillante; nebulosa duplice”.

NGC 651 = GC 386 = H I.193.

RA 1h 33m 34m, NPD 39d 7.7' (1860.0)

⁸ William Huggins, pioniere della spettroscopia, nel 1866 scoprì la natura nebulare di NGC 650/51

⁹ Further Observations on the Spectra of some Nebulae, with a Mode of determining the Brightness of these Bodies. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, Vol. 156 (1866), p. 381-397; p. 387

vB, f of Dneb; = M76

“Molto brillante; nebulosa duplice”.

Lick VIII ¹⁰

NGC 650, RA= 1:36: 0, Dec=+51: 4.0 (1900.0), M76 [p. 30]

No. 5, NGC 650, 1899 Sep 11, exp. 3h 00m, Enl. 3.4, Top S, M76 [p. 45]

Curtis

NGC 650-1, RA= 1h 36.0m, Dec=+51d 4'. Planetary. 5 s.n. ¹¹

NGC 650-1; 1h 36.0m; +51d 4'.

*“Ridimensionata di 5.8 volte da un negativo di 4 ore di esposizione. Stella centrale di magn 16. Piuttosto irregolare, ma evidentemente inclusa come uno dei più grandi membri della classe di planetarie. La porzione centrale e la più brillante della nebulosa ed è irregolare, lunga 87"x42" in p.a. 40 deg; dai margini più deboli e irregolari si estende similmente ad un anello diffuso; lunghezza totale 157" in p.a. 128 deg. – Banda più brillante nel margine meridionale della parte centrale. Rel. Exp. 20”.*¹²

¹⁰ Photographs of Nebulae and Clusters, Made with the Crossley Reflector, by James Edward Keeler, Director of the Lick Observatory, 1898-1900. Publications of the Lick Observatory, Vol. VIII, 1908, Plate 5. The Nebula M76 Persei

¹¹ Descriptions of 762 Nebulae and Clusters photographed with the Crossley Reflector. Publ. Lick Obs., No. 13, Part I, p. 9-42

¹² The Planetary Nebulae. Publ. Lick Obs., No. 13, Part III, p. 55-74 - with Lick b/w photo, Fig. 3

L'osservazione visuale

NGC 650/51, conosciuta soprattutto come M 76, è una delle più belle planetarie del cielo nonché una delle più interessanti nebulose planetarie bipolari.

Grazie alle sue discrete dimensioni e alla buona luminosità superficiale, venne facilmente scoperta e osservata già alla fine del '700 da Mèchain e Messier, i quali però non riuscirono a vedere altro che una macchia nebulosa indistinta, e solo Messier descrisse di aver osservato al suo interno minutissime stelline convincendosi che potesse trattarsi di un ammasso di stelle molto compatto.



Figura 1 - Ecco come si mostra NGC 650/1 attraverso un riflettore da 114 mm. Si nota soprattutto la forma allungata a fuso e una vago profilo rettangolare (disegno D. Barucco, anno 1993).

Oggi, utilizzando un piccolo riflettore da 114 mm possiamo osservare qualcosa di più di quello che videro gli astronomi del '700, infatti la nebulosa in questi strumenti mostra una caratteristica forma a fuso con un profilo rettangolare molto vago (figura 1). A medi ingrandimenti resta un debole bagliore dai contorni poco definiti, tuttavia alcuni astrofili, sono riusciti a distinguere all'interno dei chiaroscuri e persino la tipica forma doppia che vedremo poco più avanti. Naturalmente a causa

dell'estensione della nebulosa e della sua discreta luminosità superficiale, l'attenta osservazione con strumenti di questo diametro va affrontata necessariamente in luoghi bui con poco inquinamento luminoso, meglio se provvisti di filtro OIII.

Con il crescere del diametro il suo aspetto comincia ad essere più definito, la visibilità dei chiaroscuri con telescopi riflettori di 20 cm dona una visione globale probabilmente simile a quella avuta da W. Herschel alla fine dell'800'. L'astronomo, grazie all'utilizzo del suo grande telescopio riflettore, scoprì, infatti, un'interessante caratteristica: la nebulosa oltre ad essere allungata a fuso, appariva anche sdoppiata, tant'è che egli la classificò con due numeri di catalogo differenti e la inserì in una sezione che chiamò delle "nebulose doppie". Ad alti ingrandimenti questa caratteristica è molto evidente e per chi ha avuto la possibilità di osservare un'altra bella e grande nebulosa planetaria conosciuta come M 27, vedrà la somiglianza essere notevole, per questa ragione le è stato attribuito il nome di "little dumbbell" (piccola campana muta) che deriva da "dumbbell" (campana muta) nomignolo di M 27.

Con strumenti di diametro inferiore a 200 mm la forma a campana è difficile da scorgere a meno di non trovarci in una notte pulita lontano da fonti d'inquinamento luminoso e senza Luna.

Un newton da 200 mm mostra un fuso con direzione NW-SE formato da due parti ben distinte tanto che a circa 300x si ha l'impressione che la nebulosa sia attraversata al centro da una banda scura (figura 3); ciò resta in ogni modo solo un'impressione causata dalla bassa luminosità per gli elevati ingrandimenti. L'uso d'ingrandimenti medi restituisce la forma a fuso e la zona centrale non appare così scura.

Salvatore Calafiore ci fornisce un'interessante descrizione effettuata con un newton da 200 mm f/6 a 135x:

“Oggetto debole ma egualmente ben visibile per via della sua elevata luminosità superficiale, si distingue per i due lobi che formano un otto regolare. L'ansa più a sud appare più netta dell'altra anche se lievemente meno estesa. Condensazione che si apprezza anche nella zona centrale di M76”.

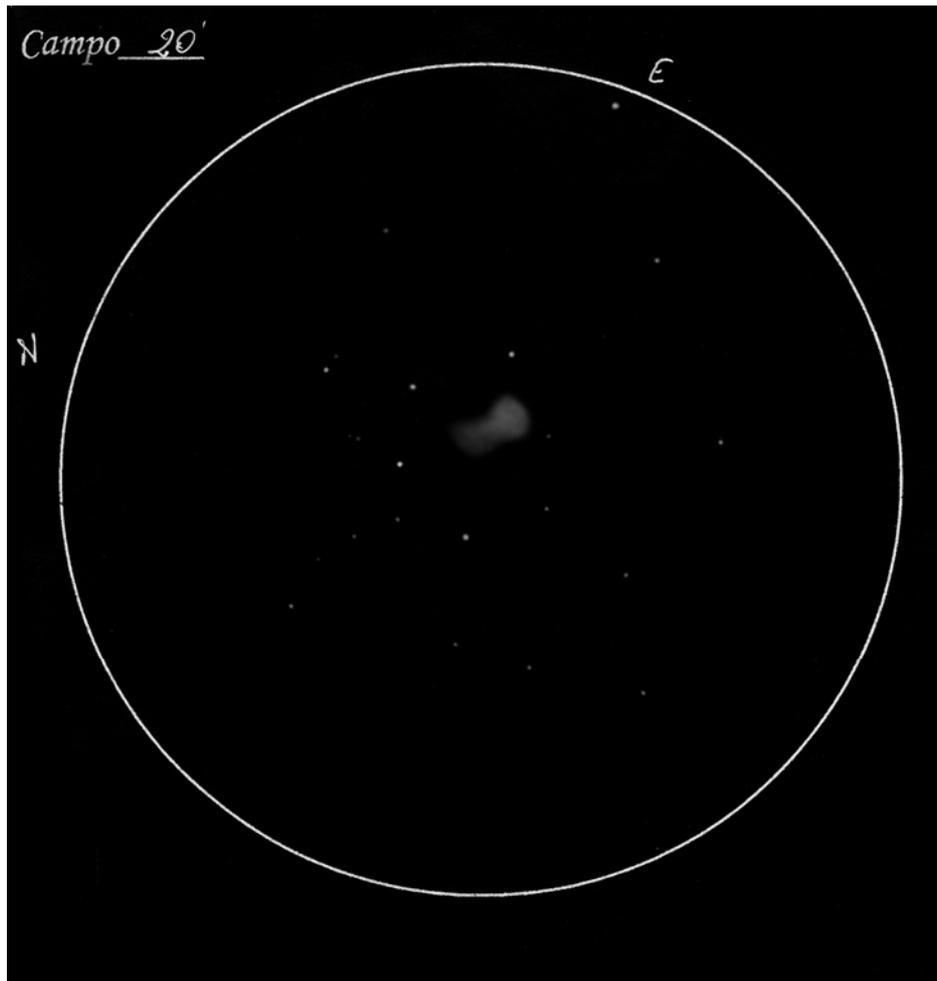


Figura 2 - Il disegno di Salvatore Calafiore con un riflettore newton da 20 cm il quale si evidenzia una curiosa forma a 8 e una non omogenea distribuzione della luminosità. Da notare il campo ricco di stelle.

L'aspetto di campana è soprattutto dato dalla forma delle due condensazioni più luminose: la condensazione di NW ha una forma triangolare estesa e di bassa luminosità (la campana), mentre quella di SW è più piccola, luminosa e con forma ellittica (il sostegno della campana). La visione quindi diventa davvero suggestiva ed incantevole.

Con strumenti di più largo diametro da 250 mm in su, se la serata è sufficientemente trasparente, la barra centrale mostra numerosi dettagli e chiaroscuri; a medi ingrandimenti si ha l'impressione di scorgere complessivamente una figura a S che è molto più chiara con strumenti di 30 cm di diametro. Anche l'astronomo Lord Rosse evidenziò questa curiosa forma e classificò M 76 come "nebulosa spirale"¹³. Questa

¹³ Le "nebulose spirali" di Lord Rosse sono principalmente galassie, di cui a quel tempo non se ne conosceva la vera natura (si ricordi il celebre disegno dell'astronomo di M 51). La forma a S di NGC 650/51 condusse Lord Rosse, per semplice analogia morfologica, ad includere questa planetaria nel gruppo di queste sue particolari nebulose.

curiosa forma a S è dovuta ad alcune strutture secondarie che prendono il nome di “ansae” e che in questo oggetto si trovano simmetricamente disposte in corrispondenza dei margini della barra centrale (vedremo in seguito con maggiore dettaglio).

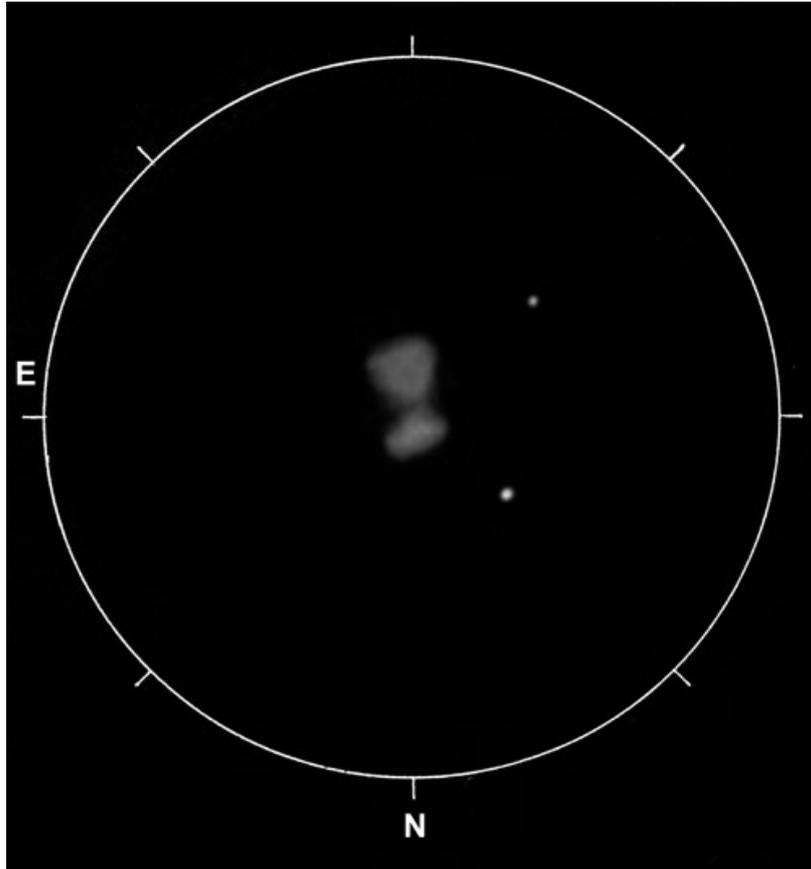


Figura 3 - Disegno della nebulosa a 300X attraverso un newton da 200 mm f/6; evidente la forma a campana molto simile a M 27 (disegno D. Barucco, anno 1995).

La reazione con il filtro OIII è piuttosto positiva e mette molto bene in risalto la barra centrale evidenziandone i contrasti; certamente questa notevole reattività aiuta molto nel caso in cui ci troviamo ad osservare da luoghi con medio-alto inquinamento luminoso. Vedremo come questa forte reattività della nebulosa sia dovuta ad un'elevata ionizzazione dei gas circostanti tanto che se abbiamo a disposizione strumenti da 300 mm in su, potremmo avere la possibilità di osservare la presenza dei due lobi esterni disposti perpendicolarmente rispetto alla barra centrale.

Infine grazie all'alto valore di declinazione, il periodo migliore per osservare NGC 650/51 è da settembre a novembre.

La ripresa digitale

NGC 650/51 è una planetaria semplice da fotografare; allo scopo ci siamo serviti di una webcam modificata ES640 Astromeccanica al fuoco diretto di un newton da 250 mm con una focale complessiva di 1200 mm, focale che abbiamo ritenuto idonea per le dimensioni e la luminosità dell'oggetto.

Grazie al diametro dello strumento (e alla buona serata) abbiamo ottenuto una discreta risoluzione della barra centrale con il pieno riscontro di alcune caratteristiche già visibili nell'osservazione visuale.



Figura 4 - Ripresa digitale di NGC 650/1 con webcam modificata ES640 monocromatica al fuoco di un newton 250 mm a 1200 mm di focale. 150 esposizioni da 25 secondi l'una sotto ottime condizioni di cielo. Da notare la zona centrale con forti disomogeneità e le ansae laterali e i due lobi polari ellittici.

La ripresa digitale nasconde l'aspetto caratteristico di campana come anche la sua duplicità in virtù della elevata luminosità della zona centrale. La nostra immagine mostra che le zone di massima luminosità si trovano lungo le estremità del rettangolo centrale con la condensazione a SW molto più brillante e concentrata. A livello

generale questa regione è poco uniforme e molto ricca di chiaroscuri dei quali se ne può avere una certa impressione visuale se si dispone di strumenti superiori ai 30 cm di diametro.

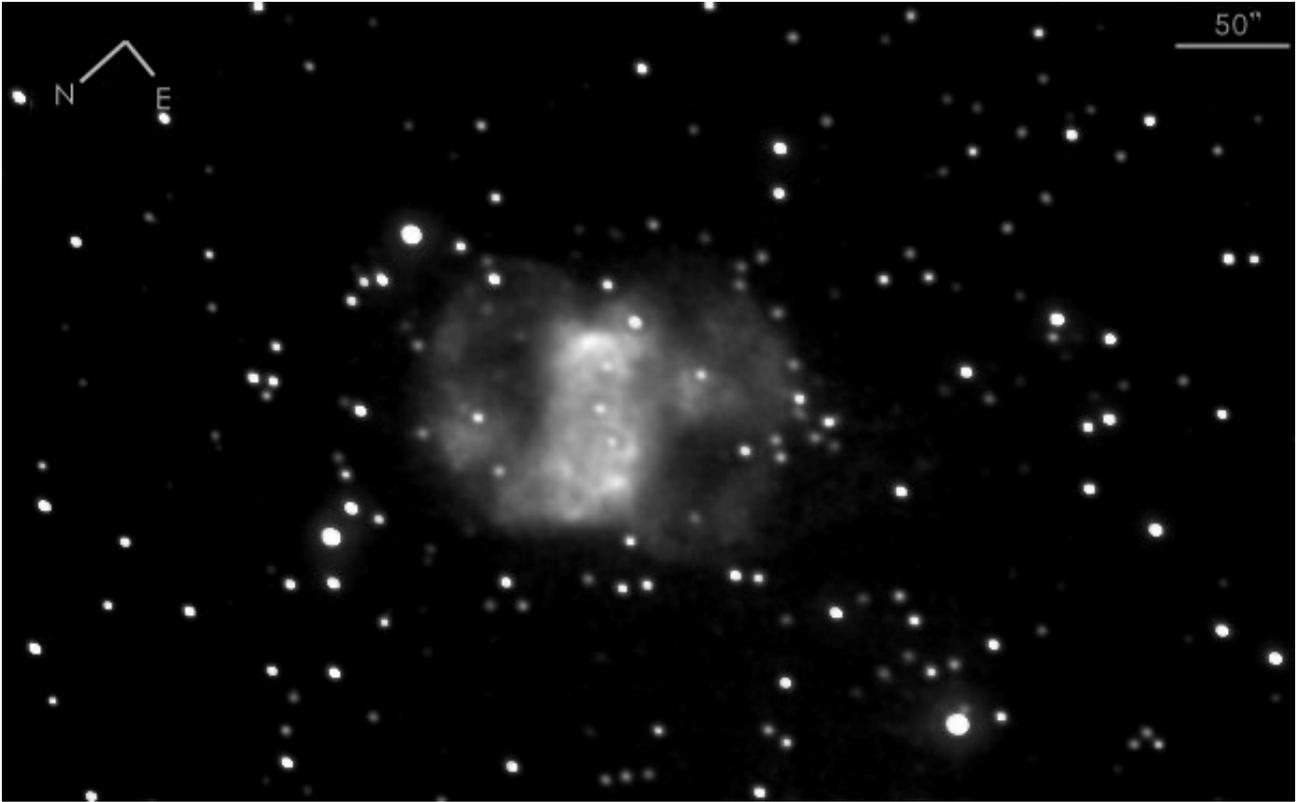


Figura 5 - Stessa immagine della precedente ma trattata con lo *stretching* logaritmico dell'istogramma. La forma globale dei lobi è molto ben evidente, inoltre a SE si osserva uno sbuffo esterno molto debole.

Nell'immagine non trattata con *stretching* logaritmico dell'istogramma (figura 4) la differenza di luminosità fra la barra centrale e i lobi laterali è molto evidente e le condensazioni laterali delle ansae sono discretamente visibili. Dopo il trattamento dello *stretching* (figura 5), la nebulosa appare più uniforme e si osserva molto bene la reale estensione raggiunta dalla sensibilità del sensore. I lobi laterali hanno una curiosa forma ellittica e una luminosità non uniforme. A questo livello di risoluzione si nota un'interessante asimmetria evidenziata maggiormente nelle immagini professionali: nel margine SW della barra centrale i lobi formano una stretta insenatura cosa che invece non avviene nel margine di NE, il quale mostra un aspetto decisamente più regolare.

Con una certa sorpresa abbiamo osservato che all'esterno del lobo di SE, si scorge uno sbuffo nebuloso molto debole; più avanti vedremo come questa propaggine non è altro che il resto di alcune strutture esterne molto deboli.



Figura 6 - La stupenda immagine di William McLaughlin è un bellissimo esempio d'immagine LRGB che mostra con grande chiarezza la stratificazione della ionizzazione, il colore rosso infatti rappresenta l'emissione dell'idrogeno ionizzato. Strumento 12,5' f/9 R.C. su montatura AP1200, luminanza con camera ST10E 9 X 10 minuti, colore con camera FLI "dream machine" 9 X 10 minuti (rosso), 9 X 7,5 minuti (verde), 4 X 10 minuti (blu) (<http://nightskypictures.com/planeb.htm>).

L'esperienza visuale ha mostrato una forte reattività con il filtro OIII, reattività che si estende positivamente anche ai lobi polari più deboli; una tricromia con filtri interferenziali quali H α , OIII, e SII potrebbe dare un risultato molto interessante per comprendere il livello di stratificazione della ionizzazione soprattutto nei lobi esterni.

E' chiaro che l'uso del filtro H α sarà utilizzato principalmente per mettere in risalto le strutture esterne dei lobi ellittici e la stratificazione di ionizzazione della regione centrale (molto ben visibile ai bordi del rettangolo); se si ha disposizione camere CCD molto sensibili, consigliamo di aumentare notevolmente il tempo di esposizione, anche sovresponendo la zona centrale in modo da rendere ben visibili le strutture esterne molto più deboli che avevamo intravisto nell'immagine con la ES640. Esistono ben poche immagini amatoriali che offrono una visione dettagliata di queste interessanti strutture.

Caratteristiche fisiche

Le condizioni fisiche e strutturali di questa planetaria bipolare hanno rappresentato per gli specialisti un vero e proprio laboratorio per studi di cinematica, grazie ai quali si è tentata una ricostruzione tridimensionale dell'oggetto. Negli ultimi decenni, l'avvento di tecnologie sempre più raffinate come spettrografi ad alta risoluzione più sensibili, ha dato la possibilità di studiare a fondo questa nebulosa, e i dati hanno permesso di tracciare con maggiore certezza le sue caratteristiche.

NGC 650/1 è una nebulosa planetaria non più giovane, la sua forma è bipolare con la presenza di una barra centrale luminosa all'apparenza rettangolare; connessi a questa struttura si trovano due lobi ellittici simmetrici, all'interno dei quali si osservano due anse simmetriche orientate secondo una direzione non coincidente con l'asse polare della nebulosa¹⁴.

In riprese a lunga esposizione nelle lunghezze d'onda dell'HII-NII, appaiono due semiarchi esterni molto deboli disposti simmetricamente rispetto alla stella centrale. Nella nostra immagine digitale con *stretching* logaritmico era visibile solo l'arco a

¹⁴ Tale asse si individua tracciando una linea perpendicolare alla barra centrale e passante per il centro.

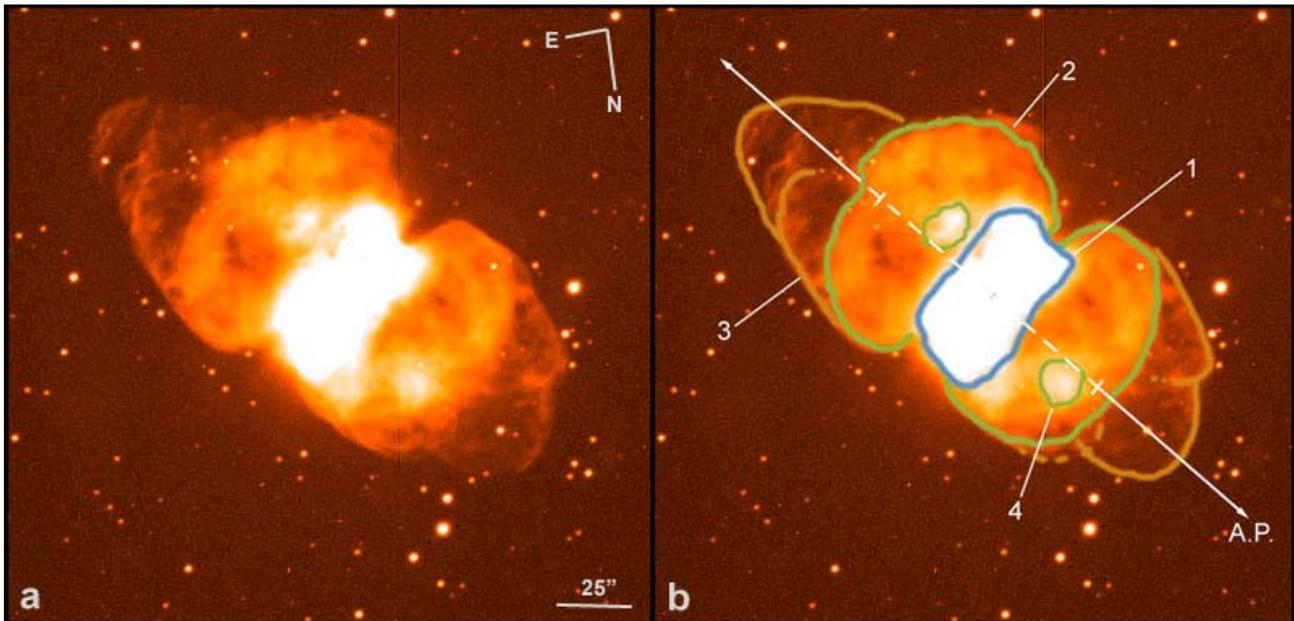


Figura 7 – Una stupenda immagine del Kitt Peak National Observatory in Halpha di NGC 650/1. In (b) abbiamo indicato i principali elementi strutturali: 1) zona centrale; 2) lobi polari interni; 3) lobi polari esterni; 4) ansae; A.P. asse polare (D. Sawyer, A. McDonald/NOAO/AURA/NSF).

SE, infatti, per svelare la vera natura di queste strutture sono necessarie esposizioni più spinte e sensori più sensibili. Le immagini forniteci dai telescopi professionali mostrano come questi due archi non sono altro che una parte di due lobi bipolari esterni. Secondo Bryce *et al.* (1996) queste strutture sono da associare all'interazione di un vecchio vento stellare sviluppatosi all'interno dell'alone AGB durante la fase di pre-emissione della PN, ovvero durante lo stadio di PPN¹⁵. Strutture bipolari analoghe durante questo stadio sono molto comuni (CRL 2688, CRL 618).

La presenza di un denso disco di polveri lungo il piano equatoriale è la ragione per cui il vento stellare lento iniziale si manifesta lungo i poli della stella; Bryce *et al.* (1996) associano la formazione di questo disco durante la fase AGB nella quale la stella subisce una maggiore perdita di massa nella regione equatoriale a causa di fattori legati alla dinamica stellare o a condizioni pre-AGB.

Gli elementi che ci permettono di ipotizzare se questi lobi esterni rappresentano un evento separato e precedente l'eiezione della PN, sono le misure di campo della velocità di espansione dei gas.

¹⁵ Proto-Planetary Nebulae

Questi lobi mostrano una ionizzazione OIII molto scarsa con la quale è stata misurata una velocità di campo fra i 20 e 5 kms^{-1} , inferiore a quanto rilevato nei lobi interni e nella zona centrale. Se questi lobi esterni e le strutture interne fossero state emesse contemporaneamente allora, si dovrebbe supporre la presenza di due venti con velocità differenti al momento dell'eiezione, ma ciò comporterebbe che le strutture interne più veloci andrebbero subito ad investire le strutture esterne più lente e non sarebbero più visibili; inoltre sulla base delle osservazioni condotte sulle più importanti PPN, non si è ancora riscontrato questo fenomeno. E' da escludere anche l'idea di un progressivo rallentamento dei lobi esterni a causa del denso materiale circumstellare in quanto ciò ne altererebbe la forma complessiva e la simmetria.

Le investigazioni cinematiche (Bryce *et al.* 1996, Sabbadin & Hamzaoglu 1980, Recillas & Pişmiş 1984, Taylor 1979) hanno dimostrato l'ipotesi di Curtis (1918) secondo la quale la zona centrale rettangolare è in realtà un disco (o toroide) in espansione con velocità radiale di circa 43 kms^{-1} (Sabbadin & Hamzaoglu, 1980; Bryce *et al.* 1996).

Le velocità dei lobi connessi al toroide mostrano invece un'anomalia: il lobo a NW si espande con una velocità di 44 kms^{-1} , mentre il lobo a SW possiede una velocità media di circa 60 kms^{-1} (Bryce *et al.* 1996). Questa differenza di velocità coinvolge anche i lobi esterni. Gli autori forniscono una possibile spiegazione sia nella scelta della posizione delle misure spettrali, sia nella leggera inclinazione dell'asse della nebulosa; considerando che i vettori delle velocità di espansione sono perpendicolari alla superficie dei lobi, le proiezioni dei vettori delle velocità sulle sezioni spettrali simmetriche possono variare in base all'angolo d'inclinazione della nebulosa (figura 8).

Un'ulteriore conferma dell'inclinazione della nebulosa è data dalla differenza di risposta doppler fra i due lobi interni basata sulla emissione di OIII. I profili delle velocità mostrano la tendenza del lobo NW ad avere una componente *blu-shift* più alta rispetto al lobo SE, ciò conferma che la direzione dell'asse della nebulosa è

leggermente inclinato rispetto al piano del cielo con il lobo NW rivolto verso la nostra direzione visuale (Bryce *et al.* 1996).

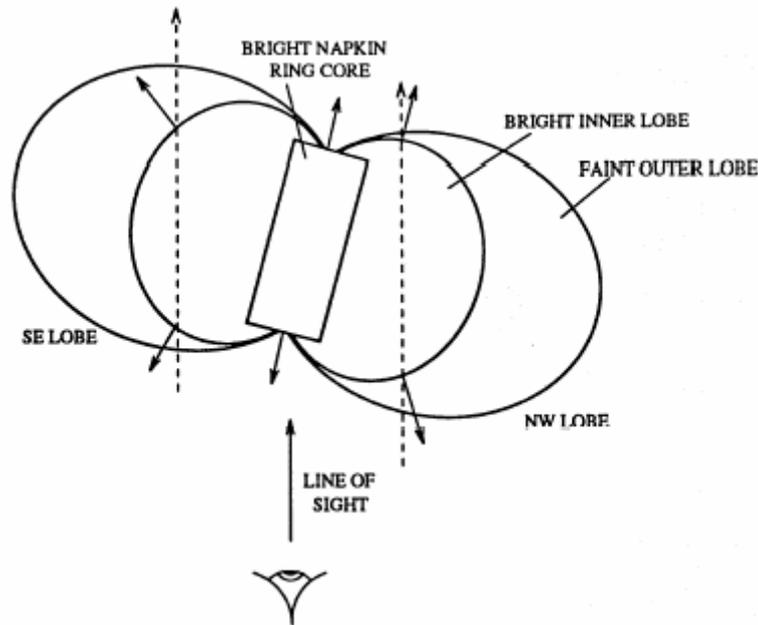


Figura 8 - Modello che spiega le differenze di velocità misurate nei rispettivi lobi polari, la linea tratteggiata rappresenta la fessura dello spettrografo (da Bryce *et al.*, 1996).

Il valore d'inclinazione dell'asse della nebulosa è ricavabile dai profili del campo delle velocità in H α e NII lungo l'asse polare (figura 9); qui si osserva una distribuzione simmetrica la quale è sovrapponibile al modello teorico di un toroide spesso in costante espansione radiale che possiede un'inclinazione di 75°-80° (Bryce *et al.* 1996) valore vicino a quello trovato da Sabbadin e Hamzaoglu (1980) di 65° (\pm 5°) utilizzando esclusivamente i campi delle velocità nell'NII.

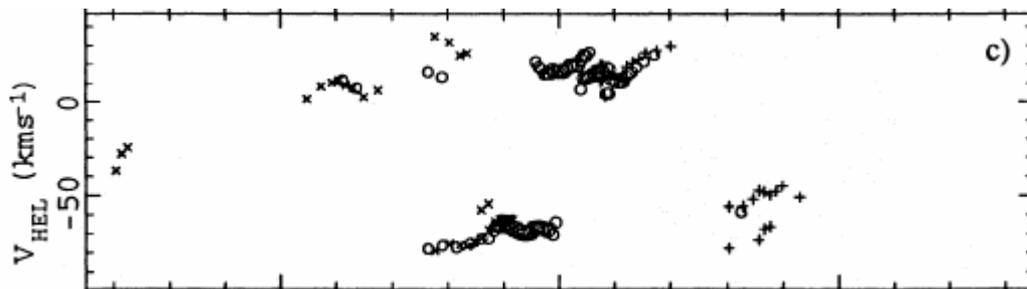


Figura 9 – Misure di velocità di espansione nell'emissione di NII lungo l'asse polare della nebulosa (da Bryce *et al.*, 1996).

Taylor (1979) notò, misurando le velocità lungo l'asse polare della nebulosa, due componenti: la componente della parte dell'anello rivolta verso la nostra direzione visuale e la componente opposta. Mentre spostando la fessura dello spettrografo parallelamente all'asse verso l'esterno, appariva una terza componente. Per spiegare la presenza contemporanea di tre componenti della velocità egli propose due modelli strutturali molto complessi che ne giustificavano l'effetto; successivamente Bryce *et al.* (1996) hanno ipotizzato che la terza componente non è altro che il vettore della velocità proiettato su un piano parallelo a quello celeste; è chiaro quindi che

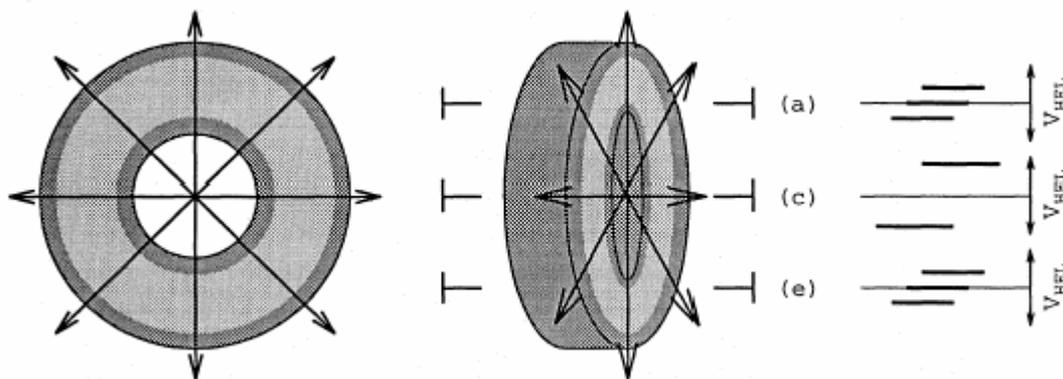


Figura 10 - Modello teorico del toroide con relativi grafici delle velocità. Spostando la fessura dello spettrografo verso l'esterno si registra la terza componente del disco in espansione (da Bryce *et al.*, 1996)

procedendo verso l'esterno tale componente aumenta a discapito delle altre due¹⁶ fino all'estremità del toroide dove avremo la sola proiezione radiale (figura 10). La velocità media di espansione del toroide è risultata essere di 43-44 kms⁻¹ (Sabbadin & Hamzouglu, 1987; Bryce *et al.* 1996), minore quindi di quella dei lobi, inoltre la distribuzione di luminosità mostra forti disomogeneità a causa della presenza di evidenti condensazioni che potrebbero testimoniare, durante la fase AGB, un vento stellare non omogeneo (Bryce *et al.*, 1996).

In figura 11, proponiamo una schematizzazione dell'area centrale, dove per riprodurre la proiezione del toroide (che è stata geometricamente approssimata ad un cerchio), ci siamo serviti del valore d'inclinazione di 75°-80° ricavato da Bryce *et al.*,

¹⁶ Sono le due proiezioni con verso opposto ma con direzione diretta verso la nostra visuale e che esprimono le componenti di *blu-shift* e *red-shift*

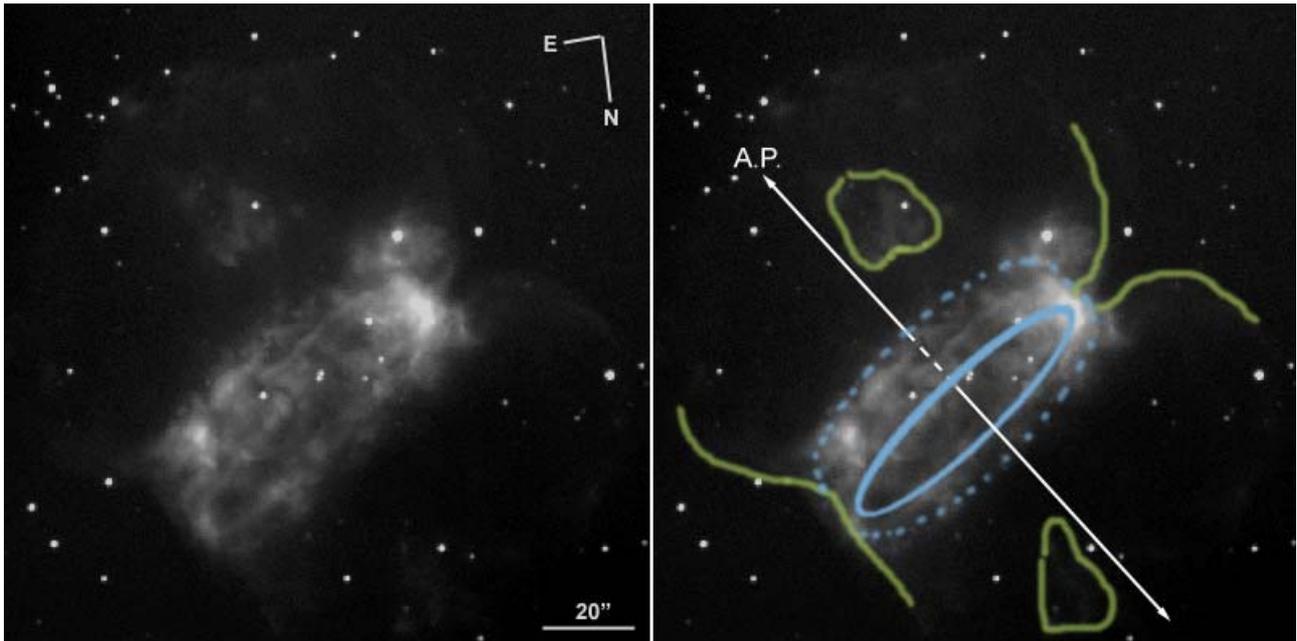


Figura 11 - Schema strutturale dell'area centrale dove abbiamo segnato in blu chiaro il toroide centrale con il margine teorico esterno tratteggiato e in verde i profili dei lobi polari e delle due ansae (foto in H α D. Sawyer, A. McDonald/NOAO/AURA/NSF).

(1996), così come per la direzione dell'asse polare. Tale rappresentazione ha il solo valore d'indicatore strutturale e non rappresenta quindi né lo spessore, né la reale estensione del toroide né tanto meno la forma. La linea tratteggiata segna il limite dell'area centrale a più alta densità mentre la linea verde, i margini dei lobi e delle due ansae.

Nel toroide osserviamo la presenza di due principali condensazioni, la prima si trova sul margine di SW ed è la zona più brillante della nebulosa, mentre l'altra, più debole, è a pochi secondi d'arco dal margine di NE. La condensazione di SW sembra essere in relazione con l'andamento del profilo dei lobi polari in prossimità del toroide, infatti, si osserva che nel margine di SW i lobi assumono una forma ad "U" stretta, mentre a NW il contatto è pressoché lineare. Noi riteniamo che la conformazione ad "U" dei lobi sia una diretta conseguenza della presenza della condensazione a SW: se ammettiamo che questa condensazione sia una regione in cui la densità del toroide è più alta che altrove, allora ciò potrebbe rappresentare un punto in cui si verifica una maggiore resistenza alla spinta di espansione del vento stellare, con una pressione di confinamento più alta; per effetto idrodinamico il flusso tenderebbe a deviare verso le direzioni più sgombre aggirando la zona a più alta

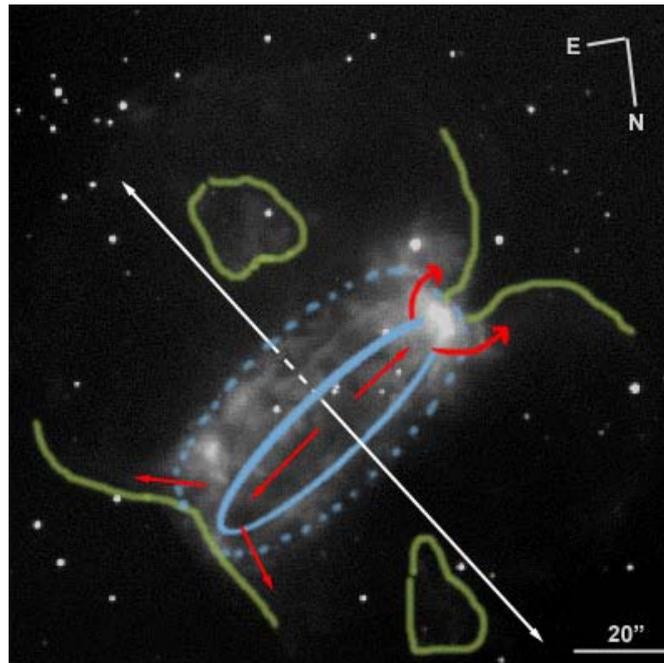


Figura 12 - Schema strutturale dell'area centrale nel quale sono indicate le direzioni di flusso di vento stellare. La causa della deformazione dei lobi polari sul bordo di SW potrebbe avere una chiara idrodinamica idrodinamica (foto in H α D. Sawyer, A. McDonald/NOAO/AURA/NSF).

densità e di conseguenza, deformando il profilo delle bolle polari, un po' come avviene quando in flusso d'acqua a regime laminare interponiamo un ostacolo.

Come si vede nello schema esposto in figura 12, l'insenatura fra i due lobi potrebbe essere stato l'effetto di questo fenomeno idrodinamico.

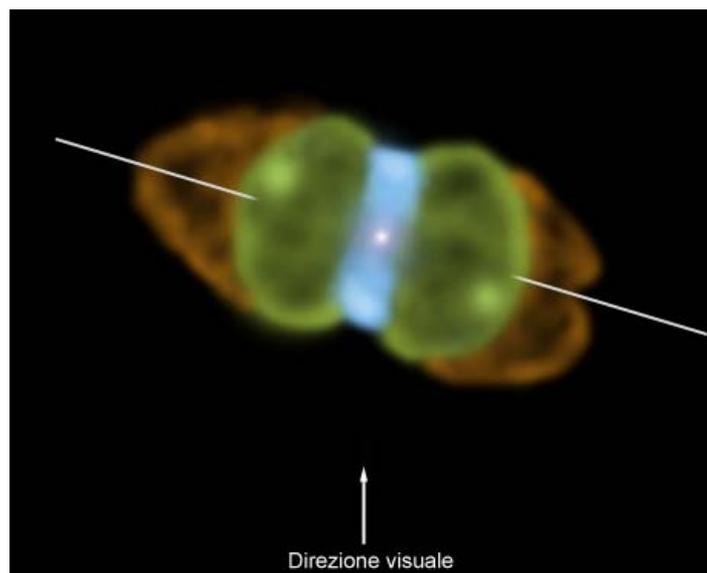


Figura 13 - Disegno teorico in proiezione laterale della nebulosa nel quale si ipotizza che la posizione delle ansae non sia coincidente con l'asse polare della nebulosa.

All'interno dei lobi polari si trovano le ansae le quali sono disposte secondo una direzione non coincidente con l'asse polare della nebulosa. I valori di campo delle velocità di espansione mostrano che queste condensazioni sono leggermente più lente rispetto ai lobi interni (Sabbadin & Hamzougou, 1987). Ciò potrebbe essere l'effetto di una proiezione dei vettori delle velocità dovuta al fatto che la loro direzione di espansione radiale sia anche inclinata rispetto al piano del cielo (figura 13).

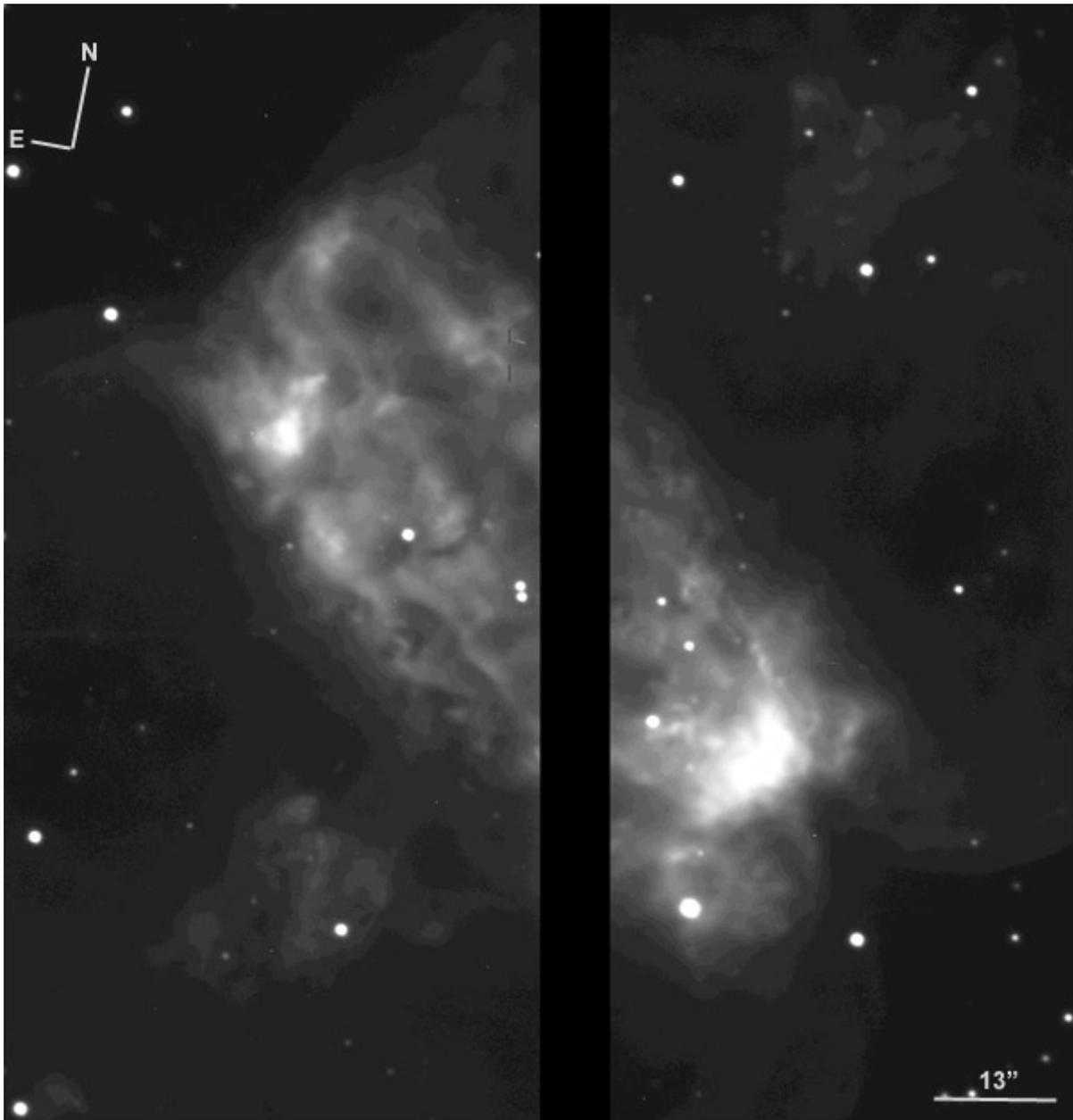


Figura 14 - Immagine che ritrae il toroide centrale di NGC 650/1 con un grande livello di dettaglio. Notare l'estrema complessità delle strutture all'interno (foto Stefano Benedetti TNG; per gentile cortesia del prof. Franco Sabbadin).

Il motivo per cui tale direzione è differente rispetto all'asse polare della nebulosa, non è chiaro; il modello di formazione delle ansae mostrato Frank *et al.* (1996) spiega che le anse si generano per la convergenza del flusso di vento stellare lungo il confine della bolla se questa ha una geometria ellittica e se il gas si trova in condizioni fisiche particolari, come nelle fasi iniziali d'eiezione. Tale orientazione potrebbe avere sia cause endogene, vale a dire legate a peculiarità non ancora note della stella progenitrice, sia esogene, cioè legate ad un ambiente circostante non isotropico (come la presenza di emissioni bipolari durante la fase di PPN lungo percorsi preferenziali del flusso stellare).

Tentiamo ora una ricostruzione dei principali eventi.

Le strutture osservate mostrano principalmente due eventi di emissione in accordo con le osservazioni di Bryce *et al.* (1996): il primo si è manifestato con un vento molto lento che si è propagato ai poli generando i lobi esterni più deboli, il secondo evento è l'eiezione della planetaria.

Probabilmente durante la fase AGB, la stella progenitrice di NGC 650/51 ha subito una perdita di massa principalmente lungo il suo piano equatoriale; Recillas-Cruz & Pişmiş (1984) ipotizzarono che una perdita di massa lungo l'equatore della stella era dovuta all'orientazione dell'asse magnetico sul piano equatoriale, poiché la maggiore perdita di massa doveva avvenire dai poli magnetici. Le ansae sarebbero state quindi generate per effetto di convergenza delle linee del campo di forza ai poli della stella. Calvet & Peimbert (1983) dimostrarono come con il crescere della massa stellare la velocità di rotazione tende ad aumentare causando una diminuzione della velocità di fuga, inoltre grazie all'espansione degli strati esterni durante la fase AGB si ha un'ulteriore diminuzione della gravità favorendo ancor di più la perdita di massa lungo l'equatore. Col tempo, con l'accumularsi di polvere e gas si genera un denso disco attorno alla stella.

Un accumulo di polveri sul piano equatoriale potrebbe anche essere accentuato dalla preesistenza di un disco circumstellare, specie se la stella ha una massa rilevante¹⁷.

Nel momento in cui la stella ha iniziato ad emettere il vento stellare lento, questo si è propagato lungo i poli attraverso l'alone AGB, provocando il primo fronte d'impatto bipolare (a, figura 16).

L'esame dei lobi bipolari esterni di NGC 650/1 evidenzia come questi siano costituiti da almeno quattro lobi con direzioni assiali differenti. Fra le PPN note alcune presentano strutture multi lobate, come ad esempio la CRL 618 (figura 15) la quale mostra quattro coppie di lobi conici con direzioni radiali (Sánchez Contreras & Sahai, 2002). Così come si osserva nella CRL 618, anche in NGC 650/1 le coppie di lobi esterni hanno un profilo conico, probabile conseguenza dell'interazione con un flusso collimato¹⁸.



Figura 15 - Foto dell'HST della nebulosa protoplanetaria CRL 618, la quale mostra l'emissione di getti collimati polari; la stella centrale non è visibile per via di un denso disco di polveri equatoriale che la oscura (ESA & A.G.G.M. Tielens SRON/Kapteyn Astronomical Institute).

¹⁷ Infatti una stella di grande massa (6-8 M_{\odot}) brucia velocemente il suo idrogeno; nel momento in cui esce dalla sequenza principale potrebbe avere ancora un disco circumstellare residuo del disco protostellare dentro il quale ha avuto origine.

¹⁸ La tipica morfologia conica è visibile in molte giovani PN e PPN che presentano toroidi o dischi di polvere equatoriali.

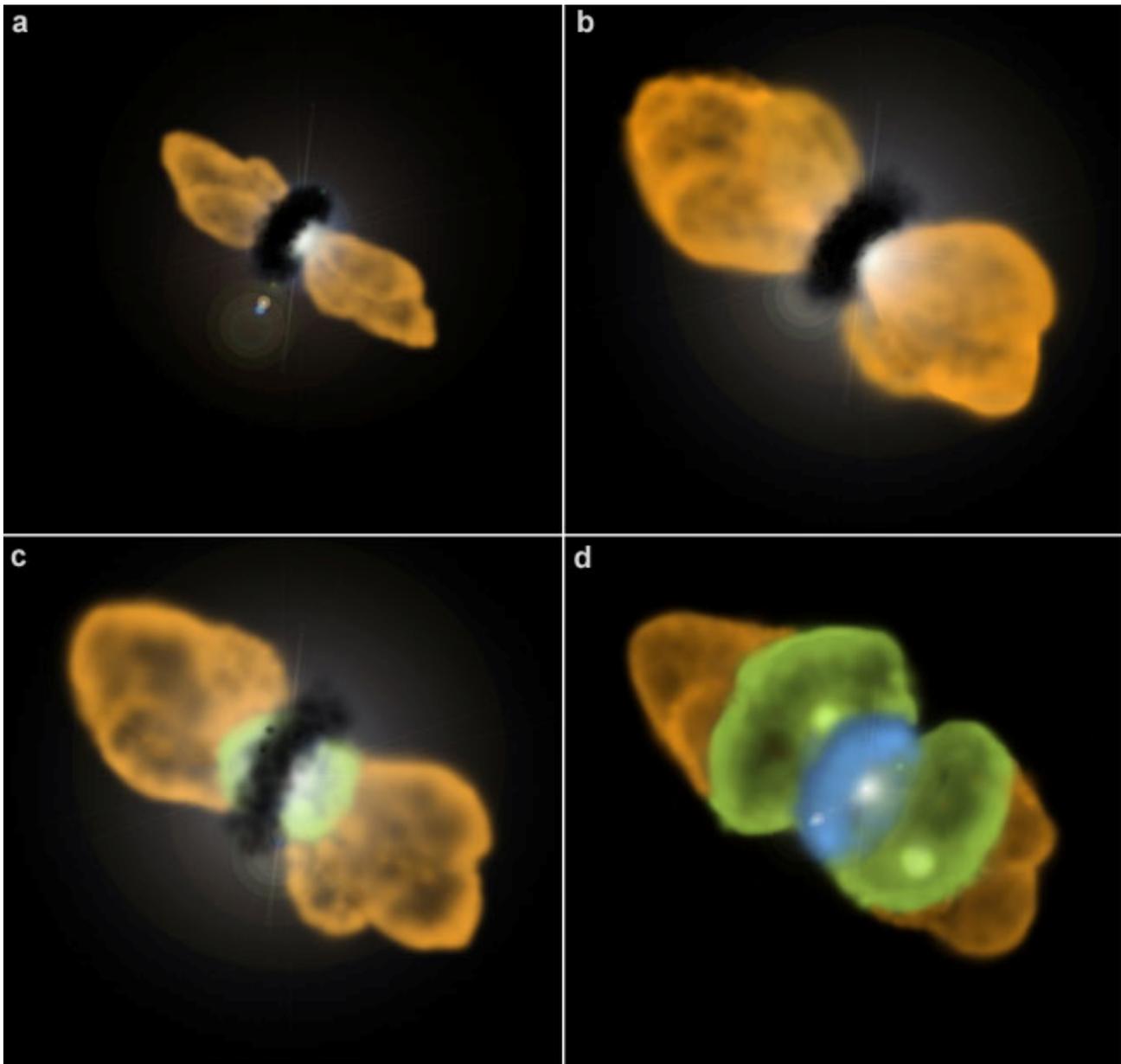


Figura 16 - Teorica ricostruzione della successione degli eventi in NGC 650/1: a) fase iniziale di PPN, emissioni di un getto o di più getti collimati lungo i poli della stella a causa della presenza di un denso disco di polveri equatoriale; b) fase di PPN avanzata, lenta espansione delle precedenti emissioni bipolari; c) fase di PN, eiezione della planetaria ed inizio della ionizzazione del toroide centrale; d) fase PN avanzata, NGC 650/1 nella condizione attuale, lenta espansione del toroide interamente ionizzato e rapida espansione dei lobi polari interni.

A seguito di questa lenta emissione di vento stellare si verifica l'eiezione della planetaria (c, figura 16). L'iniziale forza radiativa (Sabbadin & Hamzaoglu, 1981) genera un forte vento stellare che spazza tutto ciò che trova nei dintorni, nel nostro caso la forza è tale da spazzare il disco di polveri e creare un fronte d'impatto lungo i poli. Tuttavia la presenza del toroide equatoriale crea una maggiore pressione di confinamento per cui la sua espansione avviene più lentamente rispetto a quanto invece non accade lungo i poli (così come mostrato dalle misure cinematiche). A

causa della messa a nudo del nucleo molto caldo, il toroide centrale è interamente ionizzato (d, figura 16).

E' presumibile che l'espansione della planetaria risenta della precedente struttura bipolare soprattutto lungo i lobi polari, tanto che localmente la pressione di confinamento potrebbe non essere uniforme causando un'alterazione della forma dei lobi interni. Si riscontra inoltre che in alcune zone i lobi interni si espandono all'interno dei lobi esterni.

Kanster *et al.*, (1996) hanno ottenuto un'immagine a $\lambda = 2,122 \mu\text{m}$ centrata sull'emissione dell'idrogeno molecolare H_2 , nella quale è evidente un'elevata concentrazione nel toroide (figura 17); ciò dimostra come il toroide centrale sia probabilmente di origine circumstellare. Un ambiente freddo deve aver permesso l'origine e la persistenza del delicato legame molecolare dei due atomi d'idrogeno. Gli autori inoltre, sulla base della distribuzione delle nebulose bipolari sul piano galattico, indicano come con tutta probabilità la genesi delle nebulose planetarie bipolari è da imputare a stelle di massa elevata. Noi ci riteniamo parzialmente d'accordo su questa ipotesi in quanto strutture bipolari causate da concentrazioni di masse lungo equatori stellari possono avere di fatto, altre origini.

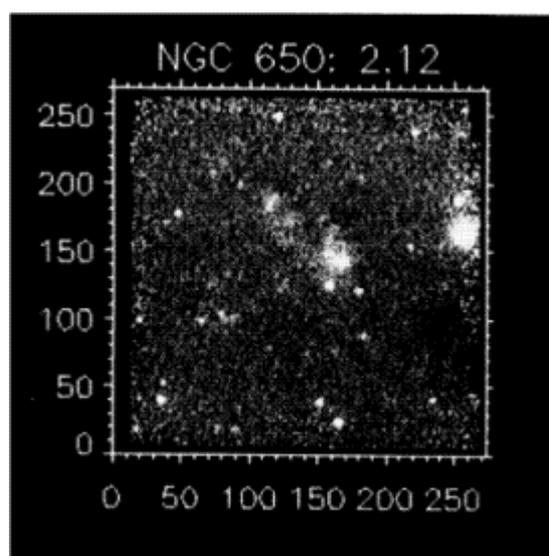


Figura 17 - Fotografia dell'emissione dell'idrogeno molecolare ($\lambda = 2,122 \mu\text{m}$) in NGC 650/1 lungo il toroide centrale (da Kanster *et al.* 1996).

In conclusione di questo paragrafo presentiamo una stima dell'età dell'evento d'eiezione della planetaria.

Per risalire ad una stima dell'età della nebulosa abbiamo considerato una velocità di espansione del toroide di circa 40 kms^{-1} ed un raggio di $30''$ d'arco ad una distanza media di 1000 pc. Tenendo presente una velocità del vento durante la fase AGB di 10 kms^{-1} , abbiamo stimato un'età approssimativa di circa 6000 anni, valore che giustifica la reale condizione evolutiva della planetaria. L'età ricavata dalla velocità di espansione dei gas unita, come vedremo, alla bassa luminosità della stella centrale, indica nella nebulosa una netta prevalenza della ionizzazione per ricombinazione sulla fotoionizzazione ultravioletta, per cui le zone esterne della planetaria mostrano un basso livello di ionizzazione così come indicato dalla intensa presenza delle righe proibite SII, NII, OII e OI (Sabbadin, comunicazione privata).

La stella centrale

La stella centrale di NGC 650/1 è stata di recente oggetto di studio per il fatto che da tempo era conosciuta come una stella doppia. Per mezzo del telescopio spaziale Hubble, Koornneer & Pottasch (1998), hanno eseguito una dettagliata misura fotometrica.

A causa della duplicità e della brevissima separazione angolare fra le due stelle, le misure fotometriche eseguite in passato risultavano essere non veritiere. Gli autori hanno scoperto, grazie alla potente capacità risolutiva dell'HST, che le stelle sono in tutto tre, facendo sorgere il dubbio se queste fossero legate gravitazionalmente o meno.

Con telescopi di medio-grande diametro e con ottimi CCD è possibile risolvere la duplicità della stella centrale in quanto hanno una separazione di circa $1,4''$; la compagna della stella centrale a sua volta è l'insieme di due strettissime componenti che sono state risolte dall'HST e che hanno una separazione di appena $0,16''$. Questa

risoluzione ha permesso di eseguire misure fotometriche molto più precise e di determinare con maggiore esattezza la temperatura della stella centrale. Si è visto quindi che la stella centrale di NGC 650/1 ha una magnitudine visuale di $17,48^{19}$ con una temperatura effettiva di 140.000° K. Gli autori hanno eseguito il calcolo considerando la stella distante 1,2 kpc, diversamente da quanto calcolato da Cahn *et al.* (1992) i quali la collocano ad una distanza di 0,73 kpc.

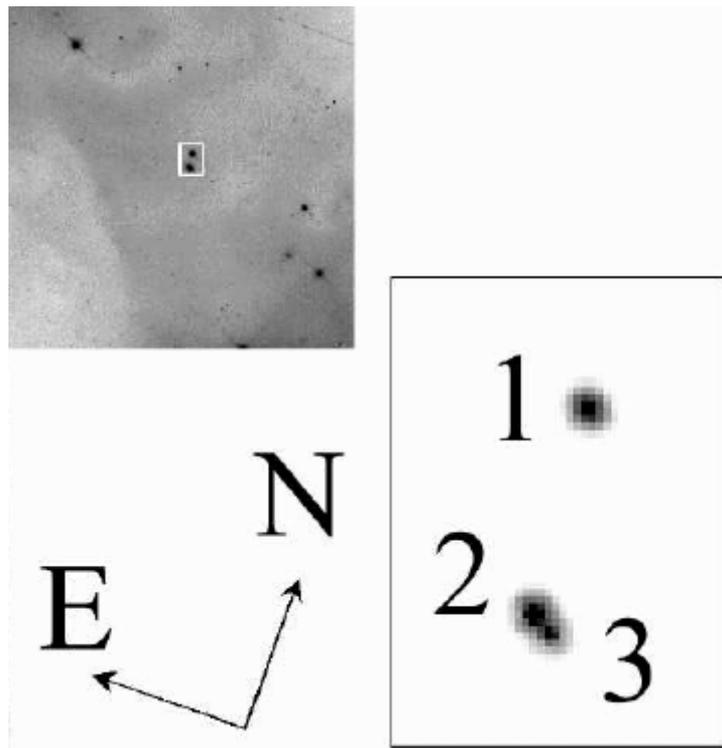


Figura 18 - Foto dell'HST ad alta risoluzione la quale mostra la stella centrale e le due componenti vicine (particolare da Koornner & Pottasch, 1998).

Infine Koornner & Pottasch (1998) hanno ricavato anche le distanze approssimative delle altre due stelle: la componente n. 3 (figura 18) dista circa 6 kpc, mentre la componente n. 2, 5 kpc, questo esclude che le due componenti (2-3, figura 18) siano legate gravitazionalmente con la stella centrale (1, figura 18), mentre la loro distanza reciproca fa supporre un possibile legame gravitazionale.

Grazie alla maggiore precisione dei dati forniti dall'HST abbiamo calcolato una magnitudine assoluta di circa 7,41, un valore che la posiziona nella zona bassa del

¹⁹ Corretta con l'estinzione interstellare

diagramma HR. Per il calcolo della luminosità effettiva della stella centrale abbiamo ottenuto il valore di correzione bolometrica da una funzione polinomiale ricavata dai dati empirici di Flower (1992) e di Schönberner (1981), tale valore è risultato essere di -7,4, dal quale abbiamo ricavato una luminosità pari a $\log(L/L_{\odot}) = 1,9$. Se riportiamo i dati di temperatura e luminosità nel diagramma HR, vediamo che la stella centrale si colloca pienamente lungo un percorso evolutivo intermedio che la porterà a diventare nana bianca ed esattamente nella zona alta della regione considerata da Stanghellini & Renzini (2000) di raffreddamento e contrazione che inizia dopo la fase di spegnimento della combustione in *shell* dell'idrogeno.

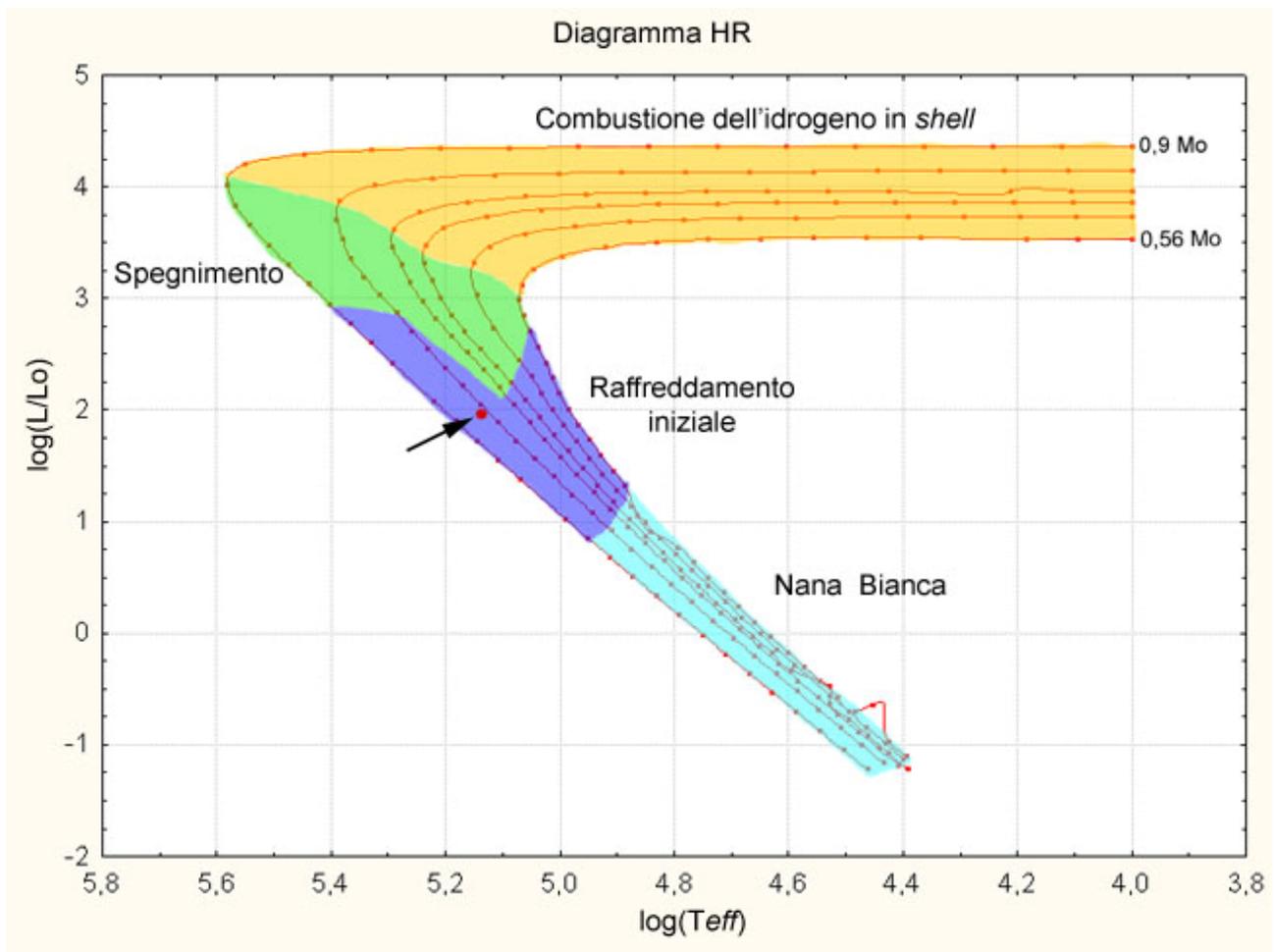


Figura 19 - Diagramma HR dove sono riportati i percorsi evolutivi teorici dei nuclei di nebulose planetarie attraverso le varie fasi individuate da Stanghellini & Renzini (2000). Il punto rosso indicato dalla freccia segna la posizione della stella centrale di NGC 650/1 nella regione di raffreddamento iniziale.

Dalla posizione nel diagramma HR rispetto alle curve evolutive teoriche di Vassiliadis & Wood (1994), è possibile stimare approssimativamente una massa

vicina a $0,75 M_{\odot}$, quindi un valore medio alto considerando che la massa media delle nane bianche è di circa $0,56 M_{\odot}$.

Sulla base della stima di luminosità e sul valore di temperatura, considerando un'emissione di corpo nero, si ricava una misura del diametro di 21000 km. Questo valore conferma il fatto che la stella centrale di NGC 650/51 si trova ancora nella piena fase iniziale di contrazione e raffreddamento, che si evince confrontando tale valore con la media dei diametri delle nane bianche evolute che risulta essere pari a circa 17000 km. Questa differenza è amplificata se consideriamo le stime teoriche fra il rapporto massa-raggio di una nana bianca evoluta, infatti, per un valore di $0,7 M_{\odot}$ ricaviamo un diametro medio di 13000 km, quindi per la stella centrale di NGC 650/51 è possibile prevedere che durante il suo lento spostamento verso la sequenza di nana bianca questa potrebbe ridurre ancora il proprio diametro del 40-60% entro i prossimi 10 milioni di anni.

Conclusioni

Con il presente lavoro abbiamo analizzato vari aspetti di NGC 650/1 i quali hanno mostrato caratteri morfologici e fisici importanti, sia per il fatto che essa rappresenta un ottimo esempio di planetaria bipolare, sia per il suo particolare stadio evolutivo avanzato.

Nella prima parte abbiamo descritto la semplicità dell'osservazione visuale di quest'oggetto con piccoli telescopi amatoriali, riscontrando la necessità di strumenti medio-grandi qualora si tentasse l'osservazione delle strutture della zona centrale e dei lobi polari. La buona reattività con il filtro OIII né facilita l'osservazione di tutte le parti della nebulosa, per tale motivo il suo utilizzo è consigliato anche sotto condizioni di cielo buone al fine di ottenere un maggiore distacco dal fondo del cielo.

La ripresa tramite mezzi digitali, così come da noi effettuata con una semplice webcam modificata, è stata poco difficoltosa ed ha avuto l'utilità di definire meglio tutta una serie di caratteristiche già evidenti nell'osservazione visuale.

Grazie ad un buon livello di eccitazione dei gas e di conseguenza ad un buon livello di stratificazione della ionizzazione, la tricromia non presenta particolari problemi e può essere molto efficace. Inoltre, se si ha la possibilità di avere a disposizione CCD di buona sensibilità e risoluzione, consigliamo di eseguire una sovraesposizione della zona centrale in modo da poter mostrare meglio le strutture dei lobi esterni molto deboli, in quanto sono raramente visibili in immagini amatoriali e potrebbero essere di particolare interesse.

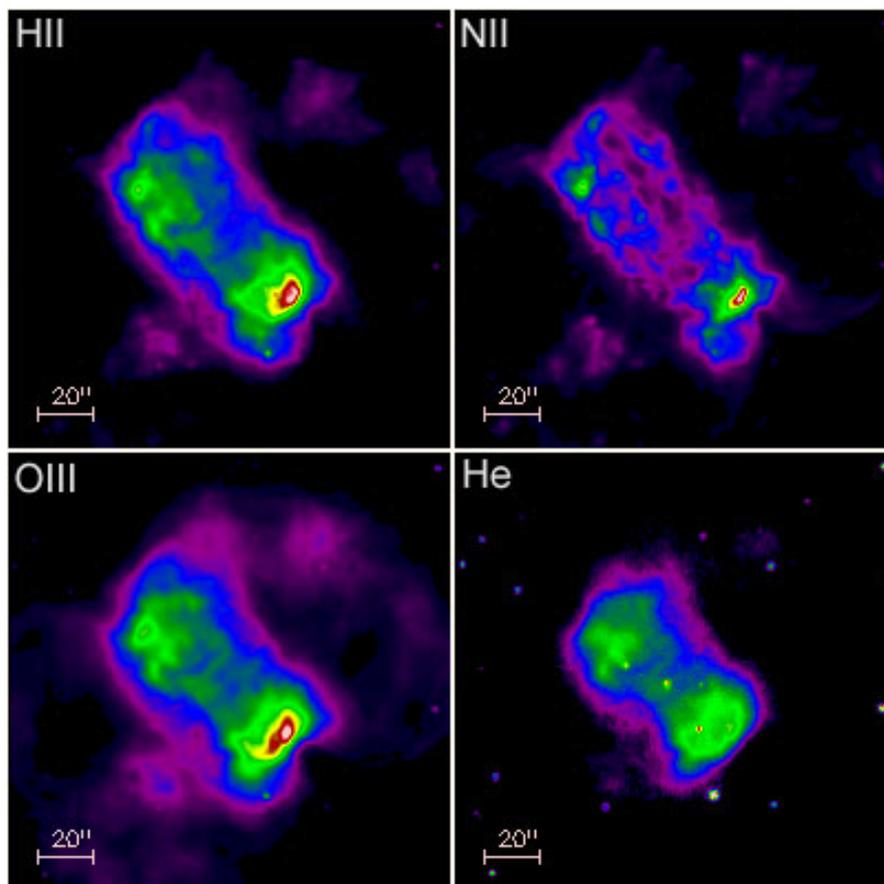


Figura 20 - NGC 650/1 nelle varie lunghezze d'onda caratteristiche (IAAT).

Grazie ad una vasta serie di misure cinematiche molto dettagliate la struttura della planetaria è particolarmente chiara: un toroide equatoriale interno provoca una

strozzatura dei lobi polari in espansione. Immagini professionali mostrano anche i lobi esterni di forma conica.

Le differenze nelle velocità fra la luminosa planetaria interna e i lobi più esterni conducono all'ipotesi che nelle fasi finali dell'evoluzione della stella progenitrice, si devono essere verificati due eventi di perdita di massa: il primo di natura bipolare con probabili emissioni di getti collimati, il secondo più energetico ha provocato l'eiezione finale della planetaria.

La causa dell'emissione bipolare del primo evento è da ricercare nell'esistenza, nelle fasi iniziali, di un toroide equatoriale molto denso, presumibilmente originato durante lo stazionamento lungo il ramo asintotico delle giganti e che ha costretto il vento stellare ad una via di fuga lungo i poli della stella. Il secondo evento più energetico ha spazzato il toroide equatoriale; la maggiore pressione di confinamento lungo l'equatore rispetto ai poli, ha permesso una maggiore velocità di espansione lungo la direzione assiale della planetaria. In seguito l'impatto con la precedente struttura bipolare ha provocato localmente delle variazioni della pressione di confinamento alterando leggermente la forma dei lobi.

Sulla base della velocità di espansione del toroide abbiamo stabilito un'età di circa 6000 anni, che colloca la nebulosa in uno stadio evolutivo avanzato, ciò è anche dimostrato dal valore di luminosità della stella centrale la quale si trova nella fase finale di contrazione e raffreddamento verso lo stadio di nana bianca. Il basso potere di fotoionizzazione ultravioletta fa prevalere una ionizzazione per ricombinazione il che giustifica la forte presenza delle righe proibite nelle zone più esterne della nebulosa (Sabbadin, comunicazione privata).

Interessante rimane la discussione sulla stima della massa della stella progenitrice. Noi partiamo dalla constatazione che il nucleo di NGC 650/1 sia di massa medio alta, il che presuppone un progenitore massivo. Sono due gli elementi a favore di questa ipotesi: 1) il confronto della posizione della stella centrale nel diagramma HR rispetto ai percorsi evolutivi di Vassiliadis & Wood (1994), la stella ricade infatti lungo i percorsi caratteristici di nuclei di planetarie con masse dell'ordine di $0,75 M_{\odot}$; 2)

l'apparente rapida evoluzione della stella centrale nella regione individuata da Stanghellini & Renzini (2000) di raffreddamento e contrazione lungo le linee teoriche evolutive, è in accordo con il calcolo dell'età d'iezione della planetaria di 6000 anni. Una massa di circa $0,56 M_{\odot}$ di una stella centrale presenta una velocità evolutiva più lenta di 10-30 volte tale da essere in contrasto con la nostra età d'iezione finale. Considerando una massa della stella centrale di circa $0,7 M_{\odot}$ possiamo applicare la relazione di Wood (1992) che lega la massa del progenitore (M_{MS}) con la massa della nana bianca (M_{wd}):

$$M_{wd} = A_{if} \exp(B_{if} M_{MS}) \quad (1)$$

dalla quale ricaviamo:

$$M_{MS} = \ln(M_{wd} / A_{if}) / B_{if} \quad (2)$$

A_{if} e B_{if} sono due valori arbitrari stabiliti in relazione alla massa della nana bianca, nel nostro caso sono rispettivamente: 0,45 e 0,110. Considerando quindi $M_{wd} = 0,7 M_{\odot}$ ottengo una massa teorica del progenitore di $M_{MS} = 4 M_{\odot}$, un valore superiore in confronto con l'opinione di Stanghellini & Renzini (2000) i quali ipotizzano che nuclei di planetarie con massa di $0,7 M_{\odot}$ siano prodotti da stelle di $3 M_{\odot}$.

La presunta condizione massiva del progenitore è in accordo con l'ipotesi di Kanster *et al.*, (1996) il quale stabilisce che nebulose bipolari con toroidi centrali siano prodotte da stelle massive. Secondo la relazione di Calvet & Peimbert (1983) tra massa stellare e velocità di rotazione, stelle con masse superiori a $2,4 M_{\odot}$ potrebbero produrre planetarie di tipo I come NGC 650/1, sulla base del fatto che stelle con tali proporzioni sviluppano velocità di rotazione di oltre 150 kms^{-1} , provocando una repentina diminuzione della velocità di fuga all'equatore e un prevalente di accumulo polveri e gas lungo il piano equatoriale durante lo stazionamento sul ramo asintotico delle giganti.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il prof. Franco Sabbadin dell'Istituto Nazionale di Astrofisica, Osservatorio Astronomico di Padova, per i consigli e i suggerimenti ricevuti durante le fasi finali di questo lavoro e per il materiale fornito.

Ringrazio l'amico Salvatore Calafiore per aver messo a disposizione la propria osservazione visuale di NGC 650/1 corredata di descrizione.

Bibliografia

- BRYCE M., MELLEMA G., CLAYTON C.A., MEABURN J., BALICK B., LÓPEZ J.A., 1996. *A kinematical investigation of the bipolar planetari nebula NGC 650-1*. – *Astronomy & Astrophysics*, 307; pp. 253-270.
- CAHN J.H., KALER J.B., STANGHELLINI L., 1992. *A catalogue of absolute fluxes and distances of planetary nebulae*. *Astronomy & Astrophysics Supp. Ser.*, 94; pp. 399-452.
- CALVET N., PEIMBERT M., 1983. *Bipolar nebulae and type I planetary nebulae*. *Rev. Mexicana Astron. Astrof.*, 5; pp. 319-328.
- CORRADI R.L.M., SCHWARZ H.E., 1993. *Kinematics of bipolar planetari nebulae*. – *Astronomy & Astrophysics*, 278; pp. 247-254.
- CURTIS H.D., 1918. *The planetary nebulae*. – *Publ. Lick Obs.*, 13; pp. 55-74

- FLOWER P.J., 1996. *Transformations from theoretical hertzsprung-russell diagrams to color-magnitude diagrams: effective temperatures, B-V colors, and bolometric correction.* – The Astrophysical Journal, 469; pp. 355-365.
- FRANK A., BALICK B., LIVIO M., 1996. *A mechanism for the production of jets and ansae in planetary nebulae.* – The Astrophysical Journal, 471; pp. 53-56.
- KOORNNEF J., POTTASCH S.R., 1998. *HST photometry of the stars near the center of PN NGC 650.* – Astronomy & Astrophysics, 335; pp. 277-280.
- MINKOWSKY R., OSTERBROCK D., 1960. *Electron densities in two planetary nebulae.* – The Astrophysical Journal, 131; pp. 537-541.
- PASCOLI G., 1985. *A morphological study of NGC 650-1.* – Astrophysics and Space Science, 114; pp. 357-364.
- PEIMBERT M., TORRES-PEIMBERT S., 1983. *Tipe I Planetary Nebulae.* – IN: Planetary nebulae; Preceedings of the Symposium, London, England, August 9-13, 1982 (A83-49126 24-89). Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., pp. 233-241.
- RECILLAS-CRUZ E., PIŞMIŞ P., 1984. *Kinematics and morphology of the planetary nebula NGC 650-651.* - Royal Astronomical Society, Monthly Notices, 210; pp. 57-67.
- SABBADIN F., HAMZAOGLU E., 1981. *A spazial-kinematical medel for the planetary nebula NGC 650-1.* - Royal Astronomical Society, Monthly Notices, 197; pp. 363-368.

- SÁNCHEZ CONTRERAS C., SAHAI R., GIL DE PAZ A., 2002. *Physical structure of the proto-planetary nebula optical long-slit spectroscopy and imaging.* – The Astrophysical Journal, 578; pp. 269-289.
- SCHÖNBERNER D., 1981. *Late Stages of Stellar Evolution: Central Stars of Planetary Nebulae.* – Astronomy & Astrophysics, 103; pp. 119-130.
- STANGHELLINI L., RENZINI A., 2000. *Synthetic post-asymptotic giant branch evolution: basic models and applications to disk populations.* – The astrophysical Journal, 542; pp. 308-327.
- TAYLOR K., 1979. *The internal kinematics of the planetary nebula NGC 650/1.* – Royal Astronomical Society, Monthly Notices, 189; pp. 511-517.
- VASSILIADIS E., WOOD P.R., 1994. *Post-asymptotic giant branch evolution of low- to intermediate-mass stars.* – The astrophysical Journal Supplement Series, 92; pp. 125-144.
- WOOD M.A., 1992. *Constraints on the age and evolution of the galaxy from the white dwarf luminosity function.* – The Astrophysical Journal, 386; pp. 539-561.