

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Astronomia

Tesi di Laurea

DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI STRUTTURALI FOTOMETRICI DELLA GALASSIA LENTICOLARE NANA NGC 4640

Relatore

Prof. Enrico Maria Corsini

Correlatrice

Dott.ssa Virginia Cuomo

Laureanda

Martina Soldà

Anno Accademico 2021/2022

Indice

Riassunto	1
1 Introduzione	1
1.1 Proprietà delle galassie barrate e nane	1
1.2 Misura del tasso di rotazione della barra	3
1.3 Scopo e schema della tesi	4
2 Acquisizione e riduzione dei dati fotometrici	8
2.1 Proprietà di NGC 4640	8
2.2 Acquisizione dei dati fotometrici	9
2.3 Riduzione dei dati fotometrici	10
2.3.1 Operazioni preliminari sull'immagine	11
2.3.2 Stima del valore residuo del cielo	13
2.3.3 Misura della funzione di allargamento	18
2.3.4 Interpolazione delle isofote	19
3 Decomposizione fotometrica bidimensionale	22
3.1 L'algoritmo GASP2D	22
3.2 Configurazione di GASP2D	25
3.3 Applicazione di GASP2D e risultati	28
4 Risultati e conclusioni	31
4.1 Risultati	31
4.2 Discussione e conclusioni	32

Riassunto

Le galassie barrate costituiscono circa il 70% delle galassie a disco dell'universo locale. La presenza della barra influenza il moto di rotazione delle stelle, regola il tasso di formazione stellare e determina l'evoluzione della galassia. In particolare, il tasso di rotazione della barra, definito come il rapporto tra il suo raggio di corotazione e la sua lunghezza, fornisce informazioni utili riguardo la struttura e l'evoluzione della galassia. Per determinarlo, è necessario condurre un'analisi fotometrica della galassia per poterne stimare i parametri strutturali e procedere con uno studio spettroscopico allo scopo di determinare la velocità angolare della barra.

In questo progetto di tesi sono stati determinati i parametri strutturali fotometrici della galassia nana NGC 4640 attraverso una decomposizione parametrica bidimensionale dell'immagine in banda i della galassia, ottenuta dall'archivio della *Sloan Digital Sky Survey*, mediante l'algoritmo *GAxpy Surface Photometry 2 Dimensional decomposition*. Combinando i risultati con quelli ottenuti dall'analisi di Fourier, la lunghezza della barra di NGC 4640 è risultata essere pari a $R_{\text{barra}} = 3.8_{-0.3}^{+0.7}$ kpc. Utilizzando i dati spettroscopici del *Multi-Unit Spectroscopic Explorer* sono stati calcolati la velocità angolare della barra $\Omega_{\text{barra}} = 22.6 \pm 14.3 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ e la velocità circolare del disco $V_{\text{circ}} = 39.0 \pm 12.0 \text{ km s}^{-1}$. È risultato che la barra presente nella galassia NGC 4640 ruota con un tasso di rotazione pari a $\mathcal{R} = 0.5_{-0.2}^{+0.7}$. Si è concluso, quindi, che la barra della galassia NGC 4640 è compatibile con il regime di rotazione veloce e che la sua formazione è probabilmente dovuta a processi interni alla galassia e non all'interazione mareale con una galassia compagna.

Capitolo 1

Introduzione

In questo capitolo vengono descritte le proprietà delle galassie barrate e in particolare di quelle nane (Sezione 1.1) e la misura del tasso di rotazione della barra in un campione scelto di galassie nane (Sezione 1.2).

1.1 Proprietà delle galassie barrate e delle galassie barrate nane

Le galassie barrate sono la famiglia di galassie a disco più numerosa nell'universo locale (Aguerri et al. 2009, Buta et al. 2015), alla quale appartiene anche la Via Lattea (Bland-Hawthorn & Gerhard 2016). La morfologia, la cinematica e la dinamica di questi oggetti dipendono dalle proprietà della barra, in quanto essa modifica la forma dello sferoide, regola il tasso di formazione stellare ed è responsabile dell'evoluzione secolare della galassia ospite (James & Percival 2016). Pertanto, lo studio delle barre stellari ha un ruolo cruciale sia nella comprensione delle galassie a disco sia nell'indagine sul loro passato evolutivo.

Le proprietà principali della barra sono:

- la lunghezza R_{barra} , che misura l'estensione delle orbite stellari che sostengono la barra;
- la forza S_{barra} , che quantifica il contributo della barra al potenziale gravitazionale della galassia;
- la velocità angolare Ω_{barra} , ovvero la frequenza angolare di rotazione della barra attorno al centro galattico;

(Corsini 2011). Quest'ultima, in particolare, contribuisce al valore del tasso di rotazione della barra \mathcal{R} , ovvero il rapporto indipendente dalla distanza tra il raggio di corotazione della barra R_{cr} e la sua lunghezza:

$$\mathcal{R} = \frac{R_{\text{cr}}}{R_{\text{barra}}} \quad (1.1)$$

dove R_{cr} è legato alla velocità angolare della barra dalla relazione:

$$R_{\text{cr}} = \frac{V_{\text{circ}}}{\Omega_{\text{barra}}} \quad (1.2)$$

con V_{circ} velocità circolare della galassia. Il raggio di corotazione è la distanza alla quale le stelle ruotano alla stessa velocità della barra.

Il tasso di rotazione \mathcal{R} permette di classificare il regime di rotazione delle barre come:

- veloce se $1.0 \leq \mathcal{R} \leq 1.4$, ovvero quando la barra si estende fino al raggio di corotazione R_{cr} e ruota alla massima velocità che le è consentita;
- lento se $\mathcal{R} > 1.4$, cioè quando la barra ha un'estensione inferiore al raggio di corotazione R_{cr} e ruota con una velocità significativamente più bassa di quella massima;

(Athanassoula 1992). In una galassia barrata la lunghezza R_{barra} e la forza S_{barra} della barra aumentano durante la sua evoluzione perché la barra cattura stelle dal disco, mentre la sua velocità angolare Ω_{barra} diminuisce in quanto la barra scambia momento angolare con le altre componenti galattiche, incluso l'alone di materia oscura. Questo fenomeno è particolarmente efficiente quando è presente un alone di materia oscura molto massiccio, perché ciò si traduce in una maggiore quantità di massa disponibile ad assorbire il momento angolare della barra vicino alle risonanze e un maggiore attrito dinamico esercitato dall'alone stesso sulla barra in rotazione. Quest'ultimo frena il moto di rotazione della barra e quindi il tasso di rotazione \mathcal{R} si sposta nel regime lento (Athanassoula et al. 2013). Debattista & Sellwood (2000) hanno posto dei vincoli alla distribuzione della materia oscura nelle galassie barrate e hanno dimostrato che gli oggetti che ospitano barre compatibili con il regime di rotazione veloce, sono immersi in aloni di materia oscura con bassa densità centrale, contrariamente alla predizione fatta dalle simulazioni cosmologiche (Navarro et al. 1997). Oltre all'effetto evolutivo dovuto all'azione dell'alone di materia oscura, ci si aspetta che le barre siano lente fin dall'inizio della loro formazione, oppure che si formino già ruotando lentamente, quando la formazione viene innescata da interazioni gravitazionali (Martinez-Valpuesta et al. 2016, Lokas 2018).

La formazione ed evoluzione di una galassia barrata è un problema che coinvolge molti parametri (Athanassoula 2003, Athanassoula et al. 2013), pertanto la misura di \mathcal{R} è utile sia per studiare l'evoluzione delle galassie barrate sia per verificare se la distribuzione di materia oscura sia consistente con le predizioni cosmologiche.

Solitamente, la misura della lunghezza R_{barra} e quella della forza S_{barra} della barra si basano sull'analisi delle immagini, mentre la stima della velocità circolare V_{circ} richiede modelli dinamici. Il calcolo della velocità angolare Ω_{barra} della barra può avvenire attraverso diversi metodi fotometrici, cinematici e dinamici (Rautiainen et al. 2008). Tuttavia, l'unica tecnica sviluppata finora per poter stimare in modo diretto la velocità angolare della barra è il metodo Tremaine-Weinberg (Tremaine & Weinberg 1984). Esso richiede la misura della:

1. distribuzione della brillantezza superficiale di un tracciante dalla fotometria;
2. distribuzione delle velocità lungo la linea di vista dello stesso tracciante dalla spettroscopia.

La relazione su cui si basa il metodo Tremaine-Weinberg si applica a un tracciante dinamico che soddisfi l'equazione di continuità, per esempio la popolazione stellare vecchia in una galassia priva di polveri, ed è data dall'equazione:

$$\Omega_{\text{barra}} \sin i = \frac{\langle V \rangle}{\langle X \rangle} \quad (1.3)$$

dove $\langle X \rangle$ e $\langle V \rangle$ sono le medie pesate della posizione e della distribuzione di velocità lungo la linea di vista delle stelle e sono misurate parallelamente all'asse maggiore del disco, mentre i è l'inclinazione del disco.

Finora il metodo Tremaine-Weinberg ha permesso di studiare oltre 100 galassie attraverso dati di spettroscopia sia a fenditura lunga ($\Delta\mathcal{R}/\mathcal{R} > 0.5$, Corsini et al. 2007) sia a campo integrale (Cuomo et al. 2020). Trascurando i casi di grande incertezza e le barre dinamicamente instabili ($\mathcal{R} < 1.0$), tutte le barre stellari analizzate finora sono compatibili con il regime veloce. Di conseguenza le loro galassie ospiti non sono dominate dalla materia oscura nella regione centrale e/o la formazione della barra non è stimolata dall'interazione tra galassie.

Tuttavia, la carenza di barre con regime di rotazione lento costituisce una sfida per i modelli teorici e richiede lo studio di candidati promettenti. Le galassie nane sono più numerose rispetto alle galassie normali e giganti (McConnachie 2012, Choque-Challapa et al. 2021) e sono molto comuni in ambienti densi, come ad esempio gruppi di galassie ed ammassi, dove sono più soggette a subire interazioni. Alcune galassie nane ospitano al proprio interno barre, lenti e bracci di spirale allo stesso modo delle galassie giganti (Barazza et al. 2002, Lisker et al. 2006, Michea et al. 2021). Comunemente si ritiene che le galassie nane ospitino aloni di materia oscura massicci e concentrati nelle regioni centrali (Adams et al. 2014, Relatores et al. 2019) che potrebbero generare il forte attrito dinamico responsabile del rallentamento della barra. Dati i loro diametri ridotti e le loro basse luminosità, le proprietà delle barre nelle galassie nane sono ancora poco conosciute a causa delle difficoltà nel rilevarle e osservarle nel dettaglio. Nell’Ammasso della Vergine le barre e le lenti sono presenti in circa la metà delle galassie nane con caratteristiche di disco (Janz et al. 2014). Questi risultati hanno portato a definire la classe di galassia nana a disco.

L’ampia gamma di proprietà delle galassie nane non è chiara ed è legata al meccanismo responsabile della loro formazione e/o ai fattori ambientali (Lisker et al. 2013). La formazione delle barre nelle galassie nane può essere innescata dal forte campo di interazione mareale presente al centro dell’ammasso (Łokas et al. 2014). Tuttavia, le galassie nane sono intrinsecamente instabili durante la formazione della barra anche in assenza di forze esterne, quindi possono essere rilevate in qualsiasi regione dell’ammasso (Barazza et al. 2002, Kwak et al. 2017).

Finora sono stati calcolati Ω_{barra} e \mathcal{R} di una sola galassia nana barrata, ovvero NGC 4431: si è concluso che essa ospita una barra veloce, anche se con un consistente grado di incertezza dovuto ai limiti della spettroscopia a fenditura lunga che è stata usata per applicare il metodo Tremaine-Weinberg (Corsini et al. 2007). La caratterizzazione delle barre e in particolare la misura di Ω_{barra} e \mathcal{R} è cruciale per la stima del contenuto di materia oscura nelle galassie nane e per calcolare l’efficienza delle interazioni galattiche nella formazione delle barre all’interno degli ammassi.

1.2 Misura del tasso di rotazione della barra in un campione di galassie nane

Allo scopo di studiare le proprietà fotometriche e dinamiche delle barre e calcolare il tasso di velocità \mathcal{R} con il metodo Tremaine-Weinberg, è stato scritto un programma di osservazione (Prog. Id. 0106.B-0158(A), P.I: V. Cuomo) per poter osservare 6 galassie nane barrate con il *Multi-Unit Spectroscopic Explorer* (MUSE), uno spettrografo a campo integrale installato sull’unità UT4 del *Very Large Telescope* (VLT) dell’*European Southern Observatory* (ESO) situato a Cerro Paranal (Cile). L’altissima precisione di MUSE permette di tenere sotto controllo le sorgenti di errore del metodo, di vincolare il regime di rotazione della barra e possibilmente di identificare le barre lente (Cuomo et al. 2019).

Gli oggetti presenti nel campione sono stati selezionati in quanto già identificate come galassie nane con caratteristiche di disco (Impey et al. 1996, Barazza et al. 2002, Lisker et al. 2006, Toloba et al. 2012, Janz et al. 2014, Venhola et al. 2018, Gómez-López et al. 2019, Peters & Kuzio de Naray 2019). Inoltre, per accertarsi della presenza di strutture nel disco che fossero riconducibili a barre è stata fatta un’analisi fotometrica preliminare. In Figura 1.1 sono riportate le immagini in falsi colori delle galassie del campione tratte dall’archivio della *Data Release 16* (DR16, Ahumada et al. 2020) della *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS¹, York et al. 2000), mentre nella Tabella 1.1 sono riportate le loro caratteristiche. Le galassie selezionate

¹La *Sloan Digital Sky Survey* è disponibile all’indirizzo <https://www.sdss.org/>

sono i candidati più promettenti per ospitare una barra lenta e sono adatti all'applicazione del metodo Tremaine-Weinberg in quanto:

- presentano inclinazione del disco e orientazione della barra intermedie rispetto agli assi maggiore e minore del disco;
- non presentano regioni di formazione stellare o polveri;
- non hanno stelle di campo o galassie vicine molto luminose.

Le osservazioni spettroscopiche del campione di galassie nane sono state eseguite tra i mesi di gennaio e aprile 2021 configurando lo spettrografo MUSE in modalità Wide Field Mode (WFM) in modo da garantire un campo di vista di 1×1 arcmin² con campionamento spaziale di 0.2 arcsec pixel⁻¹ e coprire l'intervallo di lunghezze d'onda 4800 – 9300 Å con campionamento spettrale di 1.25 Å pixel⁻¹ e una risoluzione di FWHM = 2.51 Å (Bacon et al. 2010).

Il campione di galassie nane osservato da MUSE è composto da membri dell'Ammasso della Vergine: IC 3167 è una galassia a disco con uno sferoide molto piccolo e barra asimmetrica, NGC 4483 è una galassia a disco con bracci di spirale e barra debole, NGC 4516 presenta una barra ben visibile e inclinazione intermedia, NGC 4598 è una galassia a disco con barra visibile ma priva di segnale compatibile con l'applicazione del metodo Tremaine-Weinberg, NGC 4640 è una galassia a disco con inclinazione intermedia e infine VCC 0336 è una galassia lenticolare che presenta un debole alone stellare.

1.3 Scopo e schema della tesi

Lo scopo di questo progetto di tesi è di determinare i parametri fotometrici caratteristici, in particolare la lunghezza della barra R_{barra} , di una delle galassie nane del campione, ovvero NGC 4640, allo scopo di ottenere il tasso di rotazione \mathcal{R} . Tali parametri verranno ricavati eseguendo una decomposizione fotometrica bidimensionale tramite l'algoritmo GASP2D sviluppato da Méndez-Abreu et al. (2008; 2017) e confrontati con i risultati ottenuti dall'analisi di Fourier descritta in Aguerri et al. (2009).

La tesi è organizzata come segue:

- Capitolo 1: contiene l'introduzione. Nella Sezione 1.1 vengono descritte le proprietà delle galassie barrate, in particolare di quelle nane. Nella Sezione 1.2 viene presentato l'obiettivo del programma di osservazione con MUSE e la misura del tasso di rotazione \mathcal{R} della barra con il metodo Tremaine-Weinberg. Nella Sezione 1.3 vengono presentati lo scopo e la struttura della tesi.
- Capitolo 2: presenta l'acquisizione e la riduzione dei dati fotometrici. Nella Sezione 2.1 verranno descritte le proprietà della galassia lenticolare NGC 4640. Nella Sezione 2.2 viene presentata brevemente l'acquisizione di dati fotometrici dalla SDSS. Nella Sezione 2.3 vengono descritte le procedure di sottrazione del cielo, stima della funzione di allargamento e interpolazione delle isofote della galassia.
- Capitolo 3: descrive la procedura di decomposizione fotometrica bidimensionale. Nella Sezione 3.1 viene presentato l'algoritmo di decomposizione fotometrica GASP2D e il suo funzionamento, nella Sezione 3.2 vengono descritti la sua configurazione e nella Sezione 3.3 vengono presentati i parametri fotometrici della galassia NGC 4640 ottenuti attraverso la decomposizione fotometrica.
- Capitolo 4: riporta i risultati e le conclusioni. Nella Sezione 4.1 viene confrontata la misura della lunghezza della barra di NGC 4640 ottenuta con GASP2D con quella ricavata

tramite l'analisi di Fourier. Nella Sezione 4.2 viene presentato il calcolo del tasso di rotazione della barra della galassia NGC 4640 ricavato applicando il metodo Tremaine-Weinberg ai dati spettroscopici di MUSE. Nella Sezione 4.3 sono discusse le conclusioni di questo progetto di tesi.

Galassia	α (J2000.0) [h m s]	δ (J2000.0) [° ' "]	Tipo [RC3]	Tipo [VCC]	$m_{B,T}$ [mag]	$D_{25} \times d_{25}$ [arcmin]	z	v_{3k} [km s ⁻¹]	D [Mpc]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
IC 3167	12 20 18.8	+09 32 43	—	dSB0(3),N?	14.64	1.08×0.54	0.006	2216	30.4
NGC 4483	12 30 0.6	+09 00 56	SB(s)0 ⁺ :	—	13.14	1.20×0.60	0.003	1219	16.7
NGC 4516	12 33 07.5	+14 34 30	SB(rs)ab?	—	12.76	1.23×0.62	0.003	1265	17.3
NGC 4598	12 40 11.9	+08 23 01	SB0	—	13.70	1.14×0.57	0.007	2291	31.4
NGC 4640	12 42 58.2	+12 17 11	SB?	—	14.86	1.16×0.58	0.006	2000	27.4
VCC 0336	12 19 17.6	+05 52 33	—	dE?	16.20	0.74×0.37	0.01	3410	46.7

Tabella 1.1: Caratteristiche del campione di galassie nane osservate con MUSE: (Col. 1) nome della galassia, (Col. 2) ascensione retta, (Col. 3) declinazione, (Col. 4) classificazione morfologica ricavata dal *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (RC3, de Vaucouleurs et al. 1991), (Col. 5) classificazione morfologica ricavata da Binggeli et al. (1985), (Col. 6) magnitudine totale in banda B (RC3), (Col. 7) diametri maggiore e minore dell'isofota di brillantezza superficiale $\mu_B = 25$ mag arcsec⁻² (RC3), (Col. 8) redshift ricavato dal *Nasa Extragalactic Database* (NED²), (Col. 9) velocità di recessione corretta rispetto alla radiazione cosmica di fondo delle microonde (NED) e (Col. 10) distanza calcolata tramite $D = v_{3k}/H_0$ con $H_0 = 73$ km s⁻¹ Mpc⁻¹.

²Il *Nasa Extragalactic Database* è disponibile all'indirizzo <https://ned.ipac.caltech.edu/>

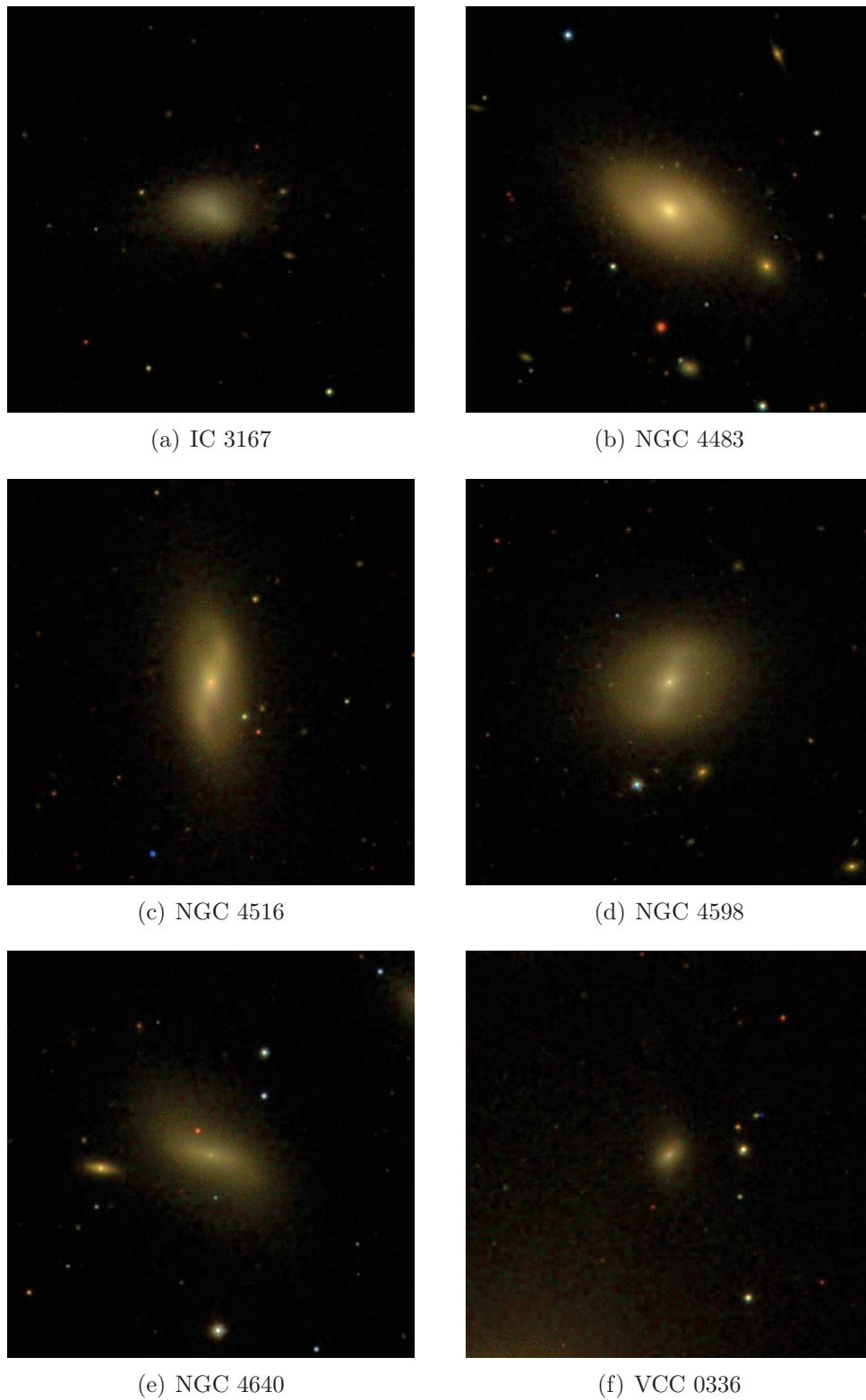


Figura 1.1: Immagini a falsi colori delle galassie nane del campione ricavate dall'archivio della SDSS DR16 (Ahumada et al. 2020). Il campo delle immagini è di 200×200 arcsec ed è orientato con il Nord in alto e l'Est a sinistra.

Capitolo 2

Acquisizione e riduzione dei dati fotometrici

In questo capitolo vengono descritte le proprietà della galassia NGC 4640 (Sezione 2.1) e le modalità di acquisizione (Sezione 2.2) e riduzione dei dati fotometrici (Sezione 2.3).

2.1 Proprietà di NGC 4640

Del campione di galassie osservate con MUSE l'oggetto ideale per operare una decomposizione fotometrica bidimensionale risulta essere NGC 4640 (Figura 2.1), in quanto presenta un disco con un'inclinazione intermedia e una barra simmetrica con un buon segnale per l'applicazione del metodo Tremaine-Weinberg di misura della sua velocità angolare. La galassia ha uno sferoide piccolo, una barra debole e possiede un debole alone stellare.

Il catalogo RC3 classifica la galassia come spirale barrata SB?; l'oggetto compare anche nell' *Uppsala General Catalogue* (UGC 7888) come galassia a spirale S (Nilson 1973) e nel *Virgo Cluster Catalogue* (VCC 1949) come membro dell'Ammasso della Vergine e galassia lenticolare nana barrata dSB0(4) (Binggeli et al. 1985). Inoltre, la galassia è presente nel *Catalogue of Galaxies and Cluster Galaxies* (CGCG 15631) come sistema doppio (Zwicky et al. 1961) e con il nome MCG+02-32-190 nel *Morphological Catalogue of Galaxies* (Vorontsov-Velyaminov et al. 1962). Più recentemente, invece, essa è stata classificata come dS0, ovvero come lenticolare nana (Trentham & Hodgkin 2002).

La galassia ha coordinate equatoriali $\alpha = 12^{\text{h}}42^{\text{m}}58.2^{\text{s}}$ (J2000.0) e $\delta = +12^{\circ}17'11''$ (J2000.0). La velocità di recessione corretta rispetto alla radiazione cosmica di fondo delle microonde è $v_{3k} = 2000 \text{ km s}^{-1}$ (Fixsen et al. 1996) e il redshift della galassia è pari a $z = 0.006$ (NED). Assumendo per la costante di Hubble un valore di $H_0 = 73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, tale velocità corrisponde ad una distanza di NGC 4640 pari a $D = 27.4 \text{ Mpc}$, con una scala pari a $132.8 \text{ pc arcsec}^{-1}$.

Il catalogo RC3 fornisce la magnitudine totale in banda B $m_{B,T} = 14.86 \text{ mag}$ e la magnitudine totale corretta $m_{B,T}^0 = 13.86 \text{ mag}$ che, con il modulo di distanza $(m - M)_B = 32.19 \text{ mag}$ (NED), corrisponde a una magnitudine assoluta totale corretta $M_{B,T}^0 = -18.33 \text{ mag}$. RC3 contiene anche i valori dell'angolo di posizione del semiasse maggiore del disco $PA = 45^{\circ}$ e dei diametri maggiore D_{25} e minore d_{25} dell'isofota di brillantezza superficiale $\mu_B = 25 \text{ mag arcsec}^{-2}$, che si traducono in una stima delle dimensioni della galassia $D_{25} \times d_{25} = 1.16 \times 0.58 \text{ arcmin}$ pari a $9.26 \times 4.63 \text{ kpc}$ e che danno un rapporto assiale pari a $q_{25} = d_{25}/D_{25} = 0.50$, e un'ellitticità $e_{25} = 1 - q_{25} = 0.50$.

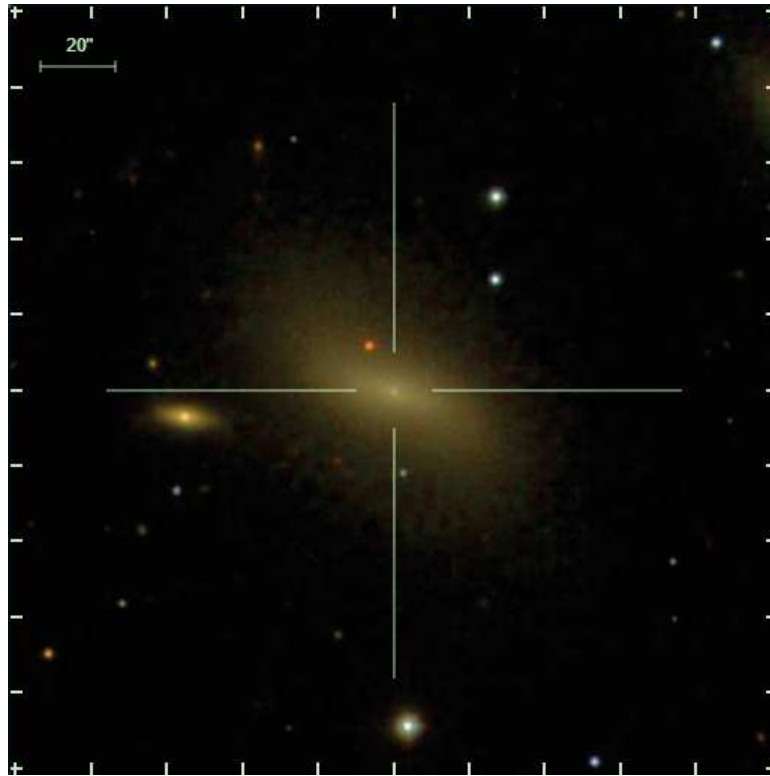


Figura 2.1: Immagine a falsi colori della galassia NGC 4640 ricavata dall'archivio della SDSS DR16 (Ahumada et al. 2020). Il campo dell'immagine è di 200×200 arcsec, che corrisponde a 26.6×26.6 kpc alla distanza della galassia ed è orientato con il Nord in alto e l'Est a sinistra.

2.2 Acquisizione dei dati fotometrici

L'immagine in banda i della galassia NGC 4640 è stata presa dall'archivio della SDSS (York et al. 2000), un'indagine conoscitiva del cielo (*survey*) che ha realizzato immagini profonde e dettagliate di un terzo del cielo e rilevato gli spettri di più di tre milioni di oggetti astronomici. Il progetto è stato suddiviso in fasi: SDSS-I (2000-2005), SDSS-II (2005-2008), SDSS-III (2008-2014) e SDSS-IV (2014-2020). Nell'ottobre 2020 è iniziata la quinta campagna osservativa SDSS-V (Kollmeier et al. 2019), i cui dati saranno resi pubblici nel corso del 2022 attraverso la DR17.

La mappatura del cielo operata dalla SDSS avviene grazie ad un telescopio situato presso l'Osservatorio di Apache Point a Sunspot nel Nuovo Messico (USA) caratterizzato da uno schema ottico di tipo Ritchey-Chrétien e costituito da uno specchio primario e uno secondario rispettivamente di 2.5 m e 1.1 m di diametro. Il telescopio è equipaggiato con una camera CCD con ampio campo di vista e con una coppia di spettrografi. Dispone di un movimento ad alta precisione, che permette di fare misurazioni di fotografia diretta con la tecnica del *Time Delay and Integration* (TDI). In questo modo, le cariche vengono spostate di pixel in pixel in sincronia con il moto dell'oggetto e parallelamente al moto di osservazione, cosicché è possibile mediare i difetti di acquisizione lungo le colonne di osservazione (Gunn et al. 2006).

La camera CCD è formata da due elementi: il primo, fotometrico, utilizza 30 CCD SITE/Tektronix di 2048×2048 pixel montati su una griglia da 5×6 rivelatori; il secondo, astrometrico, utilizza 24 CCD di 400×2048 pixel per la messa a fuoco, divisi in due gruppi da 12. La modalità TDI migliora il tempo di lettura dei CCD, i tempi di puntamento e assestamento e permette di ottenere buoni *flat field*. La scala della SDSS è pari a 0.396 arcsec pixel⁻¹ (Gunn et al. 1998).

La SDSS esegue la mappatura del cielo in cinque bande (Fukugita et al. 1996), che coprono

un intervallo di lunghezze d'onda da 3000 a 11000 Å e che hanno le seguenti lunghezze d'onda efficaci e magnitudini limite:

- banda *u*: $\lambda_e = 3351$ Å e $m_{\text{lim}} = 22.0$ mag;
- banda *g*: $\lambda_e = 4686$ Å e $m_{\text{lim}} = 22.2$ mag;
- banda *r*: $\lambda_e = 6165$ Å e $m_{\text{lim}} = 22.2$ mag;
- banda *i*: $\lambda_e = 7481$ Å e $m_{\text{lim}} = 21.3$ mag;
- banda *z*: $\lambda_e = 8931$ Å e $m_{\text{lim}} = 20.5$ mag.

Per l'acquisizione dell'immagine si utilizza il browser *SkyServer Navigate* della DR16 (Ahumada et al. 2020), che permette di visualizzare l'oggetto effettuando una ricerca per nome o coordinate equatoriali nell'apposita barra. Una volta inserito il nome della galassia, viene restituita un'immagine dell'oggetto al centro del riquadro di acquisizione, corredata da informazioni quali le coordinate della galassia e la magnitudine totale nelle bande fotometriche della SDSS. Per NGC 4640 si ha $m_{u,T} = 15.46 \pm 0.01$ mag, $m_{g,T} = 13.92 \pm 0.01$ mag, $m_{r,T} = 13.22 \pm 0.01$ mag, $m_{i,T} = 12.85 \pm 0.01$ mag, $m_{z,T} = 12.73 \pm 0.01$ mag.

Successivamente, tramite la sezione *Explore*, è possibile accedere a informazioni fotometriche e spettri della galassia. In particolare, da questa sezione è possibile scaricare le immagini in formato fits dell'oggetto nelle varie bande fotometriche, che sono state calibrate in flusso e sottratte di cielo. Tra queste, è stata scelta l'immagine in banda *i* in quanto tra le immagini disponibili è quella meno affetta dalle polveri e in cui si vede più chiaramente la barra, che è composta prevalentemente da stelle di Popolazione II.

L'immagine ottenuta dalla SDSS è mostrata nella Figura 2.2 ed è denominata `frame-i-003063-3-0072.fits`. Oltre al tipo di banda scelto, nel nome compare una sequenza di tre numeri: il `run number`, cioè il periodo di osservazione, la `camcol`, ovvero la colonna della camera, e il `field number`, vale a dire il numero del campo di osservazione. L'immagine è multistrato e calibrata in unità di nanomaggies. Ciascuno strato riporta rispettivamente:

- strato [0]: immagine del campo della galassia NGC 4640 in conteggi, non calibrata e non sottratta della brillantezza superficiale del cielo;
- strato [1]: immagine della galassia in conteggi, non calibrata e sottratta della brillantezza superficiale del cielo;
- strato [2]: immagine di calibrazione in nanomaggies conteggi⁻¹;
- strato [3]: immagine del cielo misurata in conteggi.

Il nanomaggie è un'unità di misura lineare del flusso luminoso, che corrisponde a $3.631 \cdot 10^6$ Jansky ed è legato alla magnitudine dalla relazione:

$$m = 22.5 \text{ mag} - 2.5 \log f \quad (2.1)$$

dove m è la magnitudine e f è il flusso in nanomaggies.

2.3 Riduzione dei dati fotometrici

Questa fase è stata svolta utilizzando i programmi di riduzione di dati astronomici presenti nell'*Image Reduction and Analysis Facility*³ (IRAF) e mediante programmi specifici scritti in

³IRAF è distribuito dal *National Optical Astronomical Observatory* (NOAO) che è gestito dalla *Association of University for Research in Astronomy* (AURA) insieme alla *National Science Foundation* (NSF). È disponibile all'indirizzo <http://iraf.noao.edu>

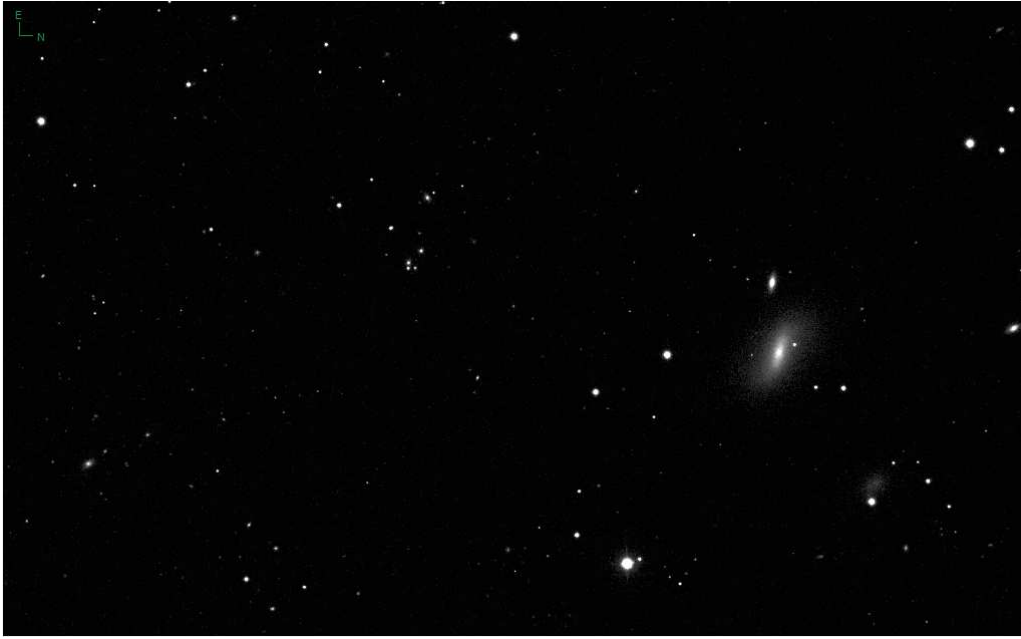


Figura 2.2: Immagine in banda *i* del campo di cielo della galassia NGC 4640 ricavata dall'archivio della SDSS DR16. L'immagine ha dimensioni 2048×1489 pixel, pari a 13.5×9.8 arcmin, e ha l'orientazione della camera in cielo al momento dell'acquisizione (in questo caso è ruotata di $91^\circ.2$ in senso antiorario rispetto al Nord).

*Interactive Data Language*⁴ (IDL) e in *Python*⁵.

2.3.1 Operazioni preliminari sull'immagine

Una volta aperto il terminale, occorre spostarsi nella cartella di lavoro che contiene i dati ricavati dalla SDSS.

Il primo passo da seguire è stimare le coordinate del centro della galassia utilizzando il comando `imexamine` di IRAF. Questo dato serve allo scopo di ritagliare e ruotare l'immagine della galassia. Per inizializzare IRAF occorre:

- digitare il comando `mkiraf` nel terminale: in questo modo si creerà un *file* di *login* nella cartella di lavoro, denominato `login.cl`;
- controllare la struttura del *file*, sostituendo la dicitura `set stdimage imt800` con `set stdimage imt4096`, in modo tale da aumentare la dimensione in pixel della regione da visualizzare, da 800×800 pixel a 4096×4096 pixel;
- aprire il terminale di IRAF con il comando `xgterm -fn 10*20 -sb &`, dove l'opzione `-fn 10*20` permette di ingrandire i caratteri nel terminale, mentre `-sb` inserisce una barra di scorrimento e `&` garantisce l'autonomia di `xgterm` dal terminale di partenza;
- far partire IRAF, digitando il comando `cl` sull'`xgterm`.

Per la visualizzazione delle immagini fits è stato utilizzato Ximtool, un'applicazione completamente autonoma che quindi può essere lanciata sia da terminale che da `xgterm`. Il comando da eseguire sul terminale è `!ximtool &`, dove il punto esclamativo permette di lanciare comandi esterni da IRAF.

⁴IDL è distribuito da *Harris Geospatial Solutions*. È disponibile all'indirizzo <http://www.harrisgeospatial.com/>

⁵*Python* è disponibile all'indirizzo <https://www.python.org/>

Dopo aver lanciato IRAF, si procede con la visualizzazione dell'immagine ricavata da SDSS DR16 tramite il comando `display frame-i-003063-3-0072.fits[0] zs- zr- z1=0 z2=100`, dove:

- `[0]` indica l'estensione che si intende visualizzare, in questo caso l'immagine del campo della galassia in conteggi;
- `zs- zr- z1=0 z2=100` permette di modificare i valori minimo e massimo (rispettivamente `z1` e `z2`) dei conteggi visualizzati dell'immagine, in modo da poter mettere in evidenza il centro della galassia in modo ottimale.

Per trovare, quindi, le coordinate del centro di NGC 4640 si procede con il comando IRAF `imexamine` dal terminale `xgterm`. Tale comando analizza le immagini in modalità interattiva mostrandole attraverso `Ximtool`, permettendo all'utente di interagire con esso attraverso sia il cursore grafico del *mouse* sia i tasti. Pertanto, spostandosi nell'immagine aperta in `Ximtool`, si posiziona il cursore sul centro dell'oggetto e si digita più volte il tasto `a`. In questo modo, IRAF restituisce una lista di informazioni riguardanti la distribuzione di luce della galassia, tra cui le coordinate del centro. `Imexamine` utilizza la fotometria di apertura, ovvero misura il flusso all'interno di un'area di forma circolare attorno al punto selezionato, pertanto le coordinate del centro coincidono con quelle del pixel più luminoso tra quelli selezionati dal cursore. Per verificare che i valori del centro siano corretti, basta spostare leggermente il cursore e ripetere la procedura: se le coordinate del centro sono corrette, i valori restituiti da IRAF risultano costanti. Per uscire dalla procedura di `imexamine` basta digitare `q`. In questo caso, le coordinate del centro di NGC 4640 restituite da IRAF sono: $x = 1548.62$ pixel e $y = 738.13$ pixel.

Il passaggio successivo implica l'utilizzo di IDL: per inicializzarlo si digita nel terminale il comando `idl`. Quindi è necessario digitare `.r setup.pro` e `setup` affinché il programma ricavi le procedure necessarie. Poiché l'immagine ricavata da SDSS DR16 è molto estesa, non centrata sulla galassia in esame e ed è ruotata di $91^\circ.2$ in senso antiorario rispetto al Nord del cielo, occorre procedere a ritagliare e ruotare l'immagine, in modo tale da centrarla sull'oggetto e orientarla correttamente con il Nord in alto e l'Est a sinistra. Per fare questo, si utilizza un'apposita procedura scritta da Enrico Maria Corsini e Luca Costantin in linguaggio IDL, `read_sdss_dr9_v2.pro`, che può operare su immagini provenienti da *Data Release* successive alla DR9. Questa procedura è composta da tre programmi `read`, `rotate` e `trim` che leggono i descrittori, cioè l'*header*, dell'immagine per tutte le successive operazioni.

La prima parte del programma, `read`, legge l'immagine multistrato e restituisce come *output* diversi valori. Per avviare la procedura si utilizzano i comandi `.r read_sdss_dr9_v2.pro` e `read_sdss`, 'frame-i-0036063-3-0072'. I valori utili restituiti dalla procedura sono:

- ZPTMAG, ovvero il punto zero della magnitudine, in questo caso: $m_0 = 27.95$ mag;
- ZPTMU, ovvero il punto zero della brillantezza superficiale: $\mu_0 = 25.94$ mag arcsec⁻²;
- Mean sky value, cioè il valore medio della brillantezza superficiale del cielo: $I_{i,\text{cielo}} = 194.94$ conteggi pixel⁻¹;
- Standard deviation sky value, vale a dire il valore della deviazione standard della brillantezza superficiale del cielo: $\sigma_{i,\text{cielo}} = 0.14$ conteggi pixel⁻¹.

Prima di procedere, è opportuno convertire l'unità di misura del valor medio della brillantezza superficiale del cielo $I_{i,\text{cielo}}$ da conteggi pixel⁻¹ a mag arcsec⁻², attraverso la formula di conversione:

$$\mu_{i,\text{cielo}} = -2.5 \log I_{i,\text{cielo}} + \mu_0 \quad (2.2)$$

che quindi risulta essere pari a $\mu_{i,\text{cielo}} = 20.22$ mag arcsec⁻².

La seconda parte del programma, `rotate`, taglia e ruota l'immagine multistrato proveniente



Figura 2.3: Immagine in banda i della galassia NGC 4640 tratta dalla SDSS DR16 dopo l'operazione di ritaglio e rotazione svolta da IDL. L'immagine ha dimensioni 1490×1490 pixel, corrispondenti a 590×590 arcsec, è centrata sulla galassia ed è orientata con il Nord in alto e l'Est a sinistra.

dalla SDSS; per farlo, si forniscono come *input* al programma: il nome dell'immagine, le coordinate del centro della galassia, le dimensioni dell'immagine desiderate e il nome dell'immagine di *output*. I comandi da digitare sono: `.r read_sdss_dr9.pro` e successivamente `rotate_sdss,'frame-i-0036063-3-0072,1548.62,738.13,1600,1600,'NGC4640_mt'`.

La Figura 2.3 mostra lo strato [0] dell'immagine NGC 4640_mt.fits, risultato della procedura `rotate` di `read_sdss_dr9_v2.pro`.

Prima di procedere con le fasi successive della riduzione dei dati fotometrici, è opportuno ricalcolare le coordinate del centro della galassia sulla nuova immagine ottenuta dalla procedura IDL, tramite il comando `imexamine`: le nuove coordinate risultano $x = 951.76$ pixel e $y = 951.43$ pixel.

Infine, è comodo salvare lo strato [0] dell'immagine di output in una nuova immagine con il comando IRAF `imcopy NGC4640_mt.fits[0] NGC4640_mt.fits`.

2.3.2 Stima del valore residuo del cielo

Le immagini fornite dal *Navigate Tool* della SDSS sono corrette e sottratte di cielo, tuttavia tale sottrazione potrebbe essere non ottimale per lo studio della galassia in questione, in quanto la *survey* misura i valori di cielo dall'analisi dell'intera immagine della fascia di cielo: non sempre questa operazione restituisce quindi un livello di cielo correttamente sottratto, che può risultare sovrastimato o sottostimato.

Per evitare di lavorare con conteggi negativi, dunque, si procede sommando 100 conteggi all'immagine di NGC 4640, tramite il comando `imarith` di IRAF. Una volta fatto questo, e verificato che tutti i conteggi abbiano valori positivi, occorre stimare i valori di ellitticità e , angolo di posizione PA e raggio massimo dell'isofota del disco della galassia attraverso il comando `ellipse` di IRAF, contenuto nei pacchetti `stsdas`, `analysis` e `isophote`. Prima di lanciare il comando

occorre digitare `epar ellipse` per poter modificare i parametri dell'algoritmo. A questo punto è necessario:

- specificare l'*input* in formato `fits`, ovvero il nome dell'immagine ottenuta dalla SDSS, e l'*output* in formato `tab`, vale a dire il nome della tabella che si ottiene da `ellipse`;
- entrare in `geompar` e:
 - inserire le coordinate del centro della galassia ottenute dopo la fase di ritaglio e rotazione dell'immagine;
 - specificare i parametri di partenza delle ellissi: sono stati scelti `sma0 = 50` come raggio dell'isofota di partenza, `minisma = 0` affinché venisse tracciata anche l'isofota più interna e come raggio dell'isofota più esterna `maxsma = 300` per poter arrivare alla regione in cui inizia il contributo del cielo;
 - inserire le stime iniziali dell'ellitticità e dell'angolo di posizione dell'isofota di partenza, dopo averle valutate visualmente dall'immagine. L'ellitticità e è definita come:

$$e = 1 - \frac{b}{a} \quad (2.3)$$
 dove b e a sono rispettivamente i semiassi minore e maggiore dell'isofota. L'angolo di posizione PA si misura in gradi, a partire dal Nord e procedendo verso Est. I valori iniziali di e e PA scelti sono: `ellip0 = 0.8` e `pa0 = 70`.
 - inserire il valore di `step` del raggio delle isofote, ovvero 1, e impostare `yes` nel campo `linear`, in modo tale da far procedere l'interpolazione di `ellipse` con passo unitario e lineare.
- entrare in `control` e:
 - impostare il numero minimo e massimo di iterazioni per ogni valore di semiasse maggiore, rispettivamente `minit = 10` e `maxit = 200`;
 - tenere fisso il centro modificando `hcentre = yes`, e lasciare liberi l'ellitticità e l'angolo di posizione con `hellip = hpa = no`.
 - nella scheda principale, spostarsi su `interac` e `region` per selezionare `yes`, in modo tale da mostrare interattivamente il risultato delle interpolazioni e mascherare tutte le sorgenti che non sono cielo.

A questo punto, `ellipse` è pronto e può essere lanciato con il comando `:go`. Per far partire l'interpolazione occorre spostare il cursore sulla schermata di `Ximtool` e premere `h`.

Il terminale `xgterm` mostra il risultato e per controllare che l'interpolazione stia procedendo bene si monitora l'ultima colonna, che contiene lo *stop code*, ovvero un numero che indica la riuscita o meno dell'interpolazione:

- 0: l'interpolazione è andata a buon fine;
- 1: `ellipse` non ha sufficienti punti per fare l'interpolazione;
- 2: raggiunto il numero massimo di iterazioni, `ellipse` non ha trovato la miglior interpolazione e restituisce i parametri dell'interpolazione dell'isofota precedente;
- 4: `ellipse` non riesce ad interpolare.

La stima di ellitticità e , angolo di posizione PA e raggio limite delle isofote esterne del disco si ricava in `xgterm` dall'ultima isofota caratterizzata da uno *stop code* diverso da 4. In questo

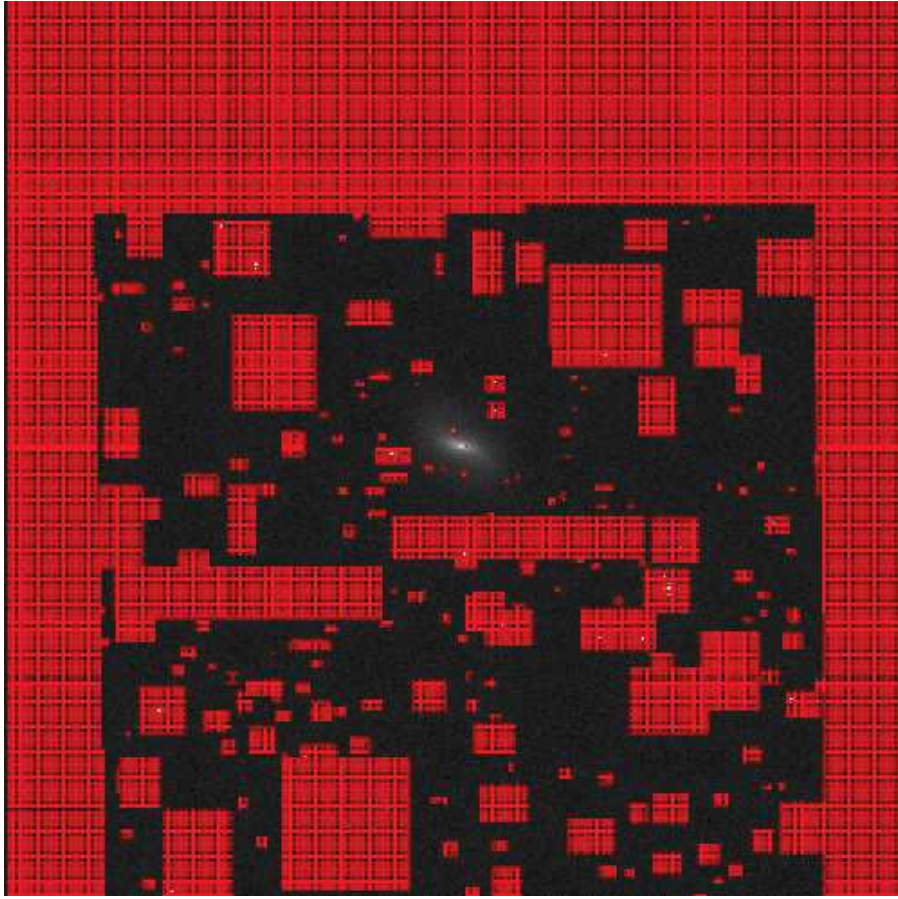


Figura 2.4: Immagine in banda i di NGC 4640 tratta dalla SDSS DR16 opportunamente mascherata. Il campo di vista è di 1490×1490 pixel, ovvero 590×590 arcsec, ed è orientato con il Nord in alto e l'Est a sinistra

caso, si deduce che le stime di ellitticità e angolo di posizione inserite in `epar ellipse` erano corrette e che il raggio dell' isofota più esterna del disco è pari a 250 pixel.

Una volta trovati questi valori, si può procedere mascherando tutte le sorgenti presenti nell'immagine al di fuori della galassia, ovvero tutte le stelle di campo, le galassie vicine e di sfondo, raggi cosmici residui e gli artefatti che non contribuiscono alla brillantezza superficiale del cielo, come i pixel difettosi e i bordi dell'immagine. A tal proposito, si utilizza nuovamente il comando `ellipse` di IRAF: per una qualsiasi sorgente, si individuano due vertici (in basso a sinistra e in alto a destra) di un ipotetico rettangolo che la racchiuda e per ciascuno si digita il tasto `m`. Mascherare un'immagine è un procedimento fondamentale, in quanto la non effettiva esclusione di tutte le sorgenti spurie potrebbe generare degli errori nella stima della brillantezza superficiale del cielo (e della galassia). Per evitare di trascurare anche le sorgenti più deboli, è opportuno agire con il tasto destro del *mouse*, modificando cioè il contrasto dell'immagine.

In Figura 2.4 viene mostrata l'immagine della galassia dopo aver definito la maschera.

Una volta conclusa quest'operazione, si procede nuovamente con `ellipse` per ricavare la stima della brillantezza superficiale del cielo. Quindi occorre entrare in `epar ellipse`, avendo cura di lasciare invariati tutti i parametri impostati in precedenza e operare le seguenti modifiche:

- entrare in `geompar` e modificare il raggio dell'isofota più esterna del disco impostando il valore restituito in precedenza con `maxsma = 250`;
- entrare in `control` e tenere fissi ellitticità e angolo di posizione con `hellip = hpa = yes`.

Una volta concluse queste modifiche, `ellipse` può essere nuovamente lanciato. Il livello della brillantezza superficiale del cielo si ricava dal `file .tab` restituito come `output` dal comando `ellipse`

sfruttando il programma `sky.py`, scritto da Edoardo Borsato in linguaggio *Python*, il quale sfrutta il metodo dei minimi quadrati non lineari di Levenberg-Marquardt (Press et al. 1992). Esso:

1. interpola con una retta i valori della brillantezza superficiale pesati con il loro errore, partendo dal centro della galassia e arrivando al semiasse maggiore massimo di `maxsma = 250` pixel. Il procedimento è stato ripetuto aumentando progressivamente il valore del semiasse maggiore minimo dell'intervallo, in modo da coprire regioni sempre più lontane dal centro della galassia fino ad arrivare ai limiti della regione campionata;
2. per ogni intervallo tabula il valore del coefficiente angolare della retta di interpolazione e del relativo errore ed è stato definito come valore del semiasse maggiore minimo limite quello, a cui è associato il primo coefficiente angolare che risulta compatibile con zero. Il valore del semiasse limite è stato utilizzato per definire l'intervallo di sma corrispondenti alla regione dell'immagine dominata dal cielo.

La media dei valori della brillantezza superficiale corrispondenti a questa regione, che risulta essere $I_{i,\text{cielo}} = 100.43 \pm 0.24$ conteggi pixel^{-1} , è stata utilizzata come stima della brillantezza superficiale del cielo e il risultato prodotto dal programma `sky.py` è visibile nella Figura 2.5. Il valore finale del cielo risulta quindi $I_{i,\text{cielo}} = 0.43 \pm 0.24$ conteggi pixel^{-1} dopo aver sottratto i 100 conteggi pixel^{-1} di soglia. Questo dimostra come il valore del cielo fosse stato leggermente sottostimato dalla SDSS, benché la differenza tra la stima del programma `sky.py` e quella operata dalla SDSS sia comunque inferiore a un conteggio pixel^{-1} . Successivamente, occorre convertire $I_{i,\text{cielo}}$ in mag arcsec^{-2} , utilizzando nuovamente l'Equazione 2.2: in questo modo il valore corretto della brillantezza superficiale del cielo risulta essere $\mu_{i,\text{cielo}} = 20.937 \text{ mag arcsec}^{-2}$.

L'ultimo passaggio consiste nel costruire l'immagine di NGC 4640 sottratta del valore di brillantezza superficiale del cielo: con il comando `imarith` di IRAF si sottrae all'immagine della galassia il valore $I_{i,\text{cielo}}$. Si procede, poi, con il calcolo dell'errore associato al cielo, ovvero la deviazione standard della brillantezza superficiale. Con il comando `imexamine` di IRAF si posiziona il cursore nelle zone dell'immagine in cui non sono presenti sorgenti o luce residua proveniente dalla galassia. Premendo il tasto `m` in ciascuna zona selezionata, con un'area di 4×4 pixel, `xgterm` fornisce di volta in volta il valore medio del segnale e la deviazione standard, che sono raccolti nella Tabella 2.1.

Utilizzando IDL si calcolano le medie di questi due valori:

- si generano due vettori contenenti i valori da mediare, per esempio `b = [num1, num2, num3, ...]`;
- si calcola la media di entrambi i vettori con il comando `print, mean(b)`.

Quindi, i valori medi della brillantezza superficiale del cielo e dello scarto quadratico medio dell'immagine di NGC 4640 risultano essere rispettivamente $\langle I_{i,\text{cielo}} \rangle = -0.14$ conteggi pixel^{-1} e $\sigma_{i,\text{cielo}} = 4.90$ conteggi pixel^{-1} . Il valore medio della brillantezza superficiale del cielo è circa zero, e lo scarto quadratico medio va convertito nelle corrette unità di misura calcolando la media dei valori assoluti di:

$$\sigma_1 = -2.5 \log \frac{I_{i,\text{cielo}} + \sigma_{i,\text{cielo}}}{I_{i,\text{cielo}}} \quad (2.4)$$

$$\sigma_2 = -2.5 \log \frac{I_{i,\text{cielo}}}{I_{i,\text{cielo}} - \sigma_{i,\text{cielo}}} \quad (2.5)$$

Pertanto, l'errore della brillantezza superficiale del cielo risulta essere $\sigma_{i,\text{cielo}} = 0.027 \text{ mag arcsec}^{-2}$, e in conclusione il valore della brillantezza superficiale del cielo è pari a $\mu_{i,\text{cielo}} = 20.937 \pm 0.027 \text{ mag arcsec}^{-2}$.

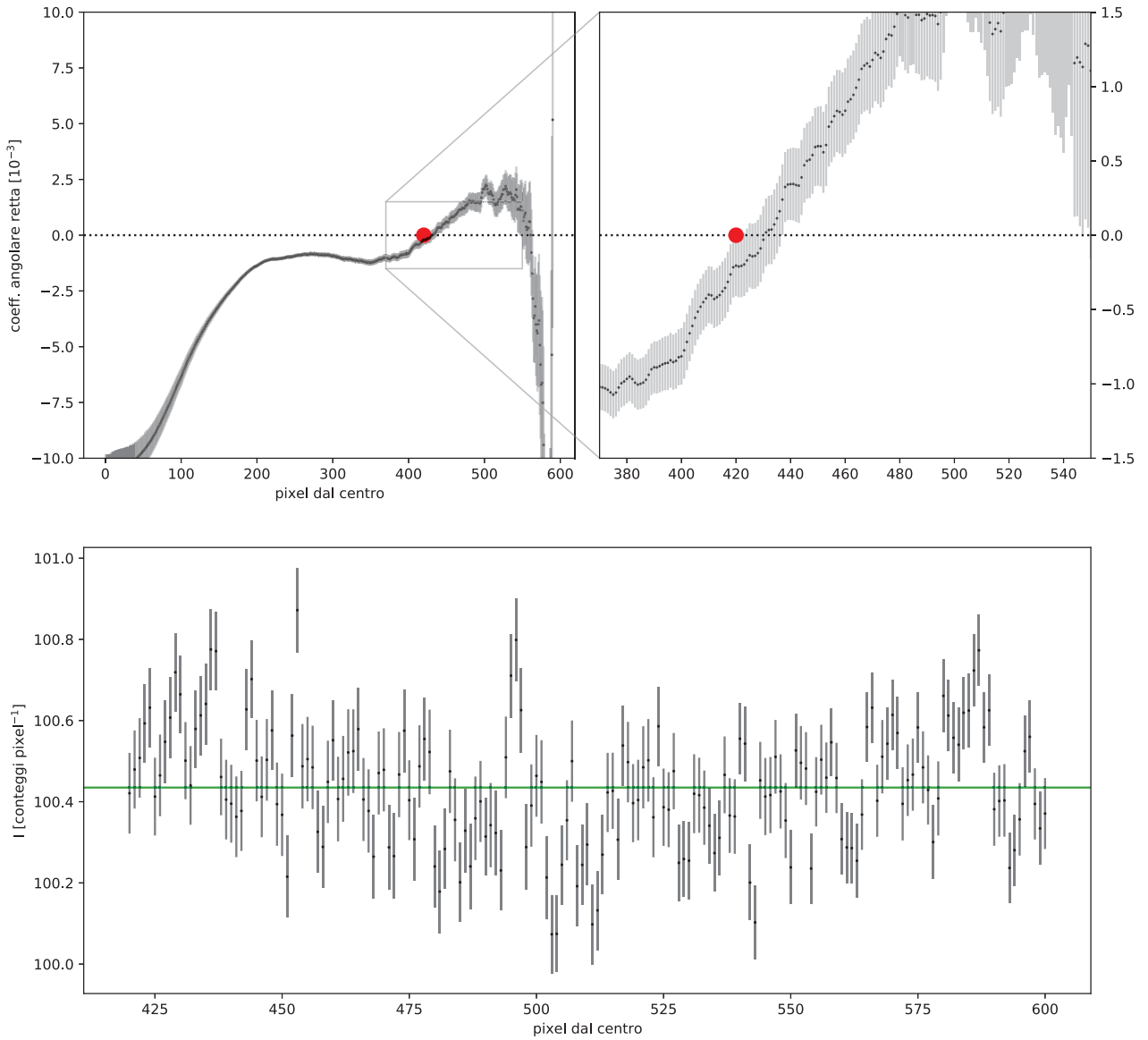


Figura 2.5: Stima del cielo nell'immagine in banda i di NGC 4640. Nelle due figure in alto viene mostrato l'andamento del valore del coefficiente angolare della retta di interpolazione in funzione del valore del semiasse maggiore minimo che definisce l'intervallo radiale di interpolazione. Il punto rosso corrisponde al semiasse maggiore minimo limite. Nella figura in basso viene mostrato l'andamento della brillantezza superficiale nell'intervallo radiale definito dal semiasse maggiore limite. Il valore medio della brillantezza superficiale del cielo è rappresentato dalla linea orizzontale verde.

Regione [pixel]	$I_{i,\text{cielo}}$ [conteggi pixel $^{-1}$]	$\sigma_{i,\text{cielo}}$ [conteggi pixel $^{-1}$]
(1)	(2)	(3)
[417:421, 277:281]	-0.118	4.083
[524:528, 1177:1181]	-0.043	7.422
[1619:1623, 1173:1177]	-1.716	4.026
[753:757, 1317:1321]	-0.584	4.348
[1222:1226, 471:475]	1.767	4.618

Tabella 2.1: Brillantezza superficiale del cielo (Col. 2) e scarto quadratico medio (Col. 3) ottenuti in cinque regioni prive di sorgenti (Col. 1) nell'immagine di Figura 2.3.

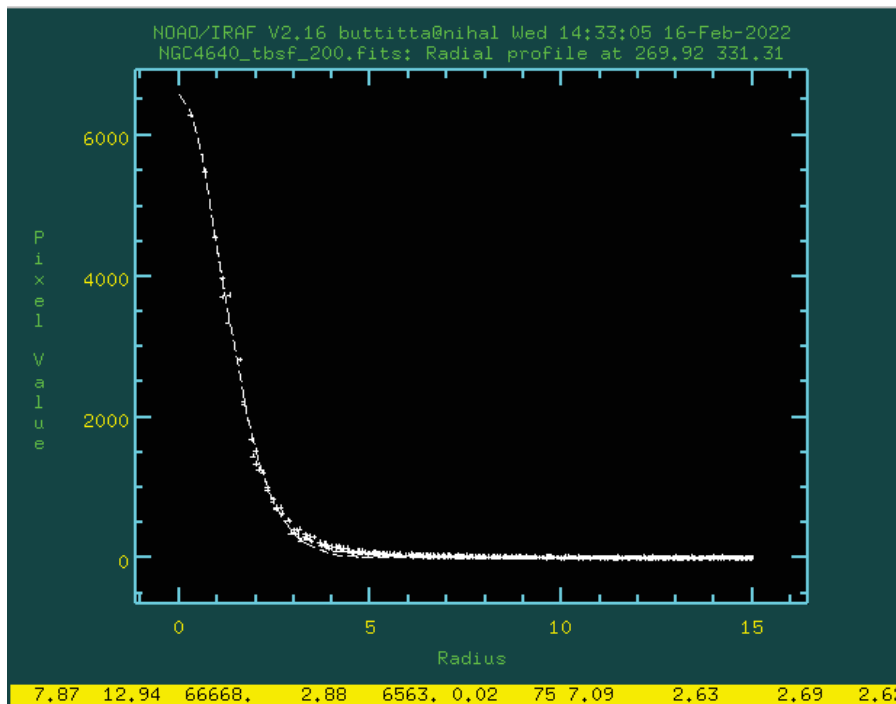


Figura 2.6: Profilo radiale di luminosità della stella di campo di coordinate in pixel $(x, y) = (269.92, 331.29)$ ottenuta dal comando `imexamine` di IRAF. La linea tratteggiata rappresenta il profilo radiale di luminosità dato dalla legge di Moffat, mentre le croci rappresentano i dati.

2.3.3 Misura della funzione di allargamento

La funzione di allargamento (PSF, ovvero *Point Spread Function*) descrive come la luce proveniente da una sorgente puntiforme venga distribuita sul piano focale del telescopio per l'azione dell'apertura finita del telescopio, della configurazione ottica e della turbolenza atmosferica. Per la SDSS, la PSF ha una tipica forma a campana ed è caratterizzata dal valore della larghezza a metà altezza del suo profilo radiale (*FWHM*).

Per stimarla si esegue un'analisi del profilo radiale di luminosità di alcune stelle di campo brillanti, ma non sature, attorno alla galassia, che risulta essere ben descritto dalla legge di Moffat (Moffat 1969):

$$PSF(x, y) = \frac{\beta - 1}{\pi\alpha^2} \left[1 + \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\alpha} \right)^2 \right]^{-\beta} \quad (2.6)$$

dove i parametri α e β definiscono la forma del profilo e sono legati alla larghezza a metà altezza dall'equazione $FWHM = 2\alpha\sqrt{2^{1/\beta} - 1}$.

Operativamente, si utilizza nuovamente il comando `imexamine` di IRAF, digitando `epar` `rimexamine` e avendo cura di selezionare Moffat alla voce `fittype` per utilizzare il profilo radiale corretto.

Dopo aver aperto l'immagine con Ximtool e lanciato il comando `imexamine`, si seleziona una decina di stelle in modo che non siano troppo deboli, non sature e con una forma preferibilmente circolare. Si posiziona il cursore sulla stella e si digitano `a` per vederne i parametri in `xgterm` e `r` per visualizzarne l'interpolazione con la legge di Moffat (Figura 2.6).

Si calcolano i valori medi di β e *FWHM* utilizzando la procedura IDL illustrata nella Sezione 2.3.2: i valori trovati sono $\beta = 4.94$ e $FWHM = 3.05$ pixel = 1.21 arcsec. In Tabella 2.2 sono riportati i valori di β e *FWHM* per il campione di stelle selezionato.

(x, y) [pixel] (1)	β (2)	$FWHM$ [pixel] (3)
(33.26, 109.16)	3.00	3.98
(40.76, 220.36)	4.54	3.22
(56.66, 135.62)	3.33	2.89
(111.08, 365.34)	5.15	3.41
(134.84, 369.88)	5.07	3.06
(207.88, 147.20)	4.29	2.43
(269.40, 276.05)	3.04	2.57
(269.92, 331.29)	8.77	2.70
(387.73, 88.07)	6.99	2.85

Tabella 2.2: Valori di β (Col. 2) e $FWHM$ (Col. 3) della PSF parametrizzata con la legge di Moffat del campione di stelle (Col. 1) selezionato attorno alla galassia.

2.3.4 Interpolazione delle isofote

Per studiare le isofote e ottenere i parametri finali della galassia NGC 4640 si utilizza nuovamente il comando `ellipse` di IRAF. Conviene procedere riducendo ancora le dimensioni dell'immagine della galassia tramite il comando `imcopy`: il cielo inizia a circa 150 pixel dal centro, quindi si procede a ritagliare l'immagine di NGC 4640 e la maschera a 200 pixel dal centro.

Una volta ritagliata l'immagine, si calcolano nuovamente le coordinate del centro con lo stesso procedimento illustrato in precedenza nella Sezione 2.3.1: le nuove coordinate sono $x = 201.76$ pixel e $y = 201.43$ pixel.

Infine, tramite il comando `epar ellipse` si modificano parametri come il nome dell'immagine di *input*, il nome del *file .tab* fornito come *output* dal programma, le coordinate del centro e la lunghezza massima del semiasse maggiore della galassia (`maxsma = 156.`) e avendo cura di lasciare liberi i parametri di ellitticità e angolo di posizione delle ellissi. Una volta modificati i parametri, si lancia `ellipse` con il comando `:go`: il risultato finale dell'interpolazione è visibile nella Figura 2.7. I parametri delle ellissi sono riportati nella Tabella 2.3.

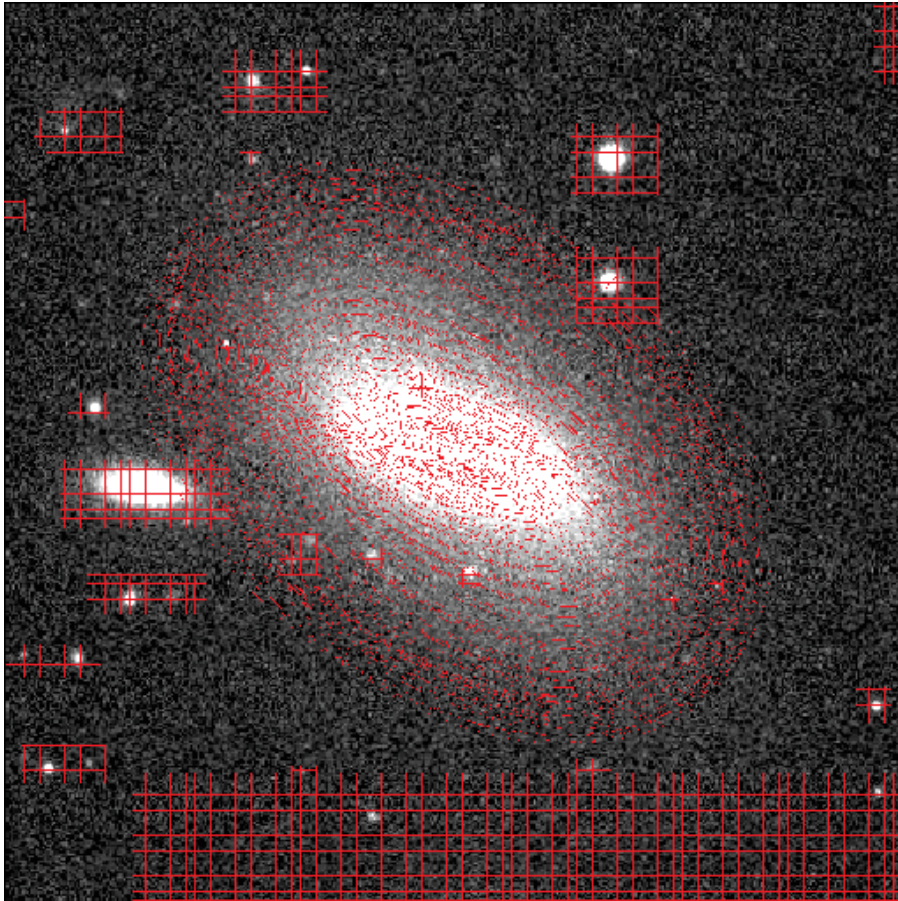


Figura 2.7: Risultato dell'interpolazione di ellipse sull'immagine in banda i della galassia NGC 4640 tratta dalla SDSS DR16, con le sorgenti debitamente mascherate. Le dimensioni dell'immagine sono di 200×200 pixel, che corrispondono a 79.2×79.2 arcsec, ed è orientata con il Nord in alto e l'Est a sinistra.

a	I	e	PA	a	I	e	PA	a	I	e	PA
[pixel]	[conteggi pixel ⁻¹]		[°]	[pixel]	[conteggi pixel ⁻¹]		[°]	[pixel]	[conteggi pixel ⁻¹]		[°]
(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
1.00	410.26 ± 26.91	0.167 ± 0.078	62.75 ± 15.14	53.00	54.82 ± 4.61	0.573 ± 0.005	69.50 ± 0.42	105.00	16.62 ± 4.07	0.467 ± 0.009	53.64 ± 0.70
2.00	320.21 ± 25.35	0.041 ± 0.031	51.41 ± 22.94	54.00	53.32 ± 4.59	0.570 ± 0.006	69.28 ± 0.51	106.00	16.17 ± 4.42	0.467 ± 0.009	53.55 ± 0.76
3.00	278.40 ± 15.11	0.162 ± 0.032	73.82 ± 6.05	55.00	52.77 ± 4.41	0.574 ± 0.006	69.45 ± 0.44	107.00	14.44 ± 4.16	0.419 ± 0.010	50.62 ± 0.86
4.00	256.20 ± 13.18	0.251 ± 0.026	79.33 ± 3.47	56.00	51.23 ± 4.73	0.574 ± 0.006	69.05 ± 0.46	108.00	14.12 ± 4.06	0.419 ± 0.010	51.38 ± 0.87
5.00	236.64 ± 10.20	0.258 ± 0.018	76.00 ± 2.38	57.00	50.59 ± 4.85	0.579 ± 0.005	68.74 ± 0.41	109.00	13.83 ± 4.00	0.419 ± 0.009	51.38 ± 0.82
6.00	225.06 ± 7.03	0.304 ± 0.020	73.02 ± 2.28	58.00	50.39 ± 4.94	0.585 ± 0.005	68.19 ± 0.42	110.00	13.32 ± 4.10	0.419 ± 0.011	51.04 ± 0.93
7.00	218.34 ± 7.78	0.357 ± 0.020	71.48 ± 2.01	59.00	45.96 ± 4.36	0.550 ± 0.006	68.43 ± 0.51	111.00	13.67 ± 4.42	0.429 ± 0.010	49.01 ± 0.82
8.00	209.29 ± 7.94	0.378 ± 0.017	73.74 ± 1.66	60.00	44.62 ± 4.72	0.550 ± 0.007	68.43 ± 0.55	112.00	13.25 ± 4.31	0.429 ± 0.011	49.94 ± 0.95
9.00	201.23 ± 8.87	0.412 ± 0.020	75.00 ± 1.80	61.00	44.67 ± 4.73	0.557 ± 0.006	67.42 ± 0.47	113.00	12.77 ± 4.17	0.428 ± 0.012	49.94 ± 1.03
10.00	195.02 ± 9.16	0.447 ± 0.016	75.30 ± 1.36	62.00	43.42 ± 4.99	0.557 ± 0.007	67.02 ± 0.57	114.00	12.43 ± 4.00	0.426 ± 0.012	50.26 ± 1.01
11.00	186.49 ± 8.23	0.461 ± 0.013	75.74 ± 1.13	63.00	42.29 ± 4.79	0.550 ± 0.006	66.51 ± 0.47	115.00	12.02 ± 3.99	0.418 ± 0.012	49.70 ± 1.02
12.00	178.21 ± 7.51	0.470 ± 0.013	76.34 ± 1.10	64.00	41.27 ± 4.66	0.547 ± 0.006	67.24 ± 0.49	116.00	11.80 ± 4.02	0.418 ± 0.009	49.04 ± 0.79
13.00	172.63 ± 7.01	0.486 ± 0.012	76.31 ± 0.99	65.00	40.65 ± 5.09	0.548 ± 0.006	66.49 ± 0.48	117.00	11.12 ± 4.06	0.397 ± 0.009	48.96 ± 0.83
14.00	167.20 ± 6.54	0.498 ± 0.010	76.30 ± 0.77	66.00	39.23 ± 4.85	0.539 ± 0.007	65.63 ± 0.50	118.00	10.94 ± 4.05	0.397 ± 0.012	48.06 ± 1.07
15.00	160.59 ± 6.17	0.503 ± 0.010	76.64 ± 0.75	67.00	37.54 ± 4.49	0.532 ± 0.006	65.35 ± 0.47	119.00	9.24 ± 3.88	0.360 ± 0.013	49.77 ± 1.24
16.00	157.07 ± 6.75	0.522 ± 0.009	76.42 ± 0.73	68.00	36.68 ± 4.51	0.530 ± 0.007	64.39 ± 0.55	120.00	9.43 ± 4.07	0.371 ± 0.011	49.39 ± 1.04
17.00	152.17 ± 6.63	0.532 ± 0.009	76.27 ± 0.69	69.00	36.50 ± 4.42	0.536 ± 0.006	63.88 ± 0.48	121.00	9.39 ± 4.28	0.381 ± 0.013	48.31 ± 1.18
18.00	148.85 ± 7.82	0.547 ± 0.010	76.46 ± 0.79	70.00	35.81 ± 4.52	0.538 ± 0.006	63.69 ± 0.50	122.00	9.89 ± 4.53	0.402 ± 0.013	47.72 ± 1.14
19.00	143.82 ± 7.87	0.552 ± 0.010	76.54 ± 0.79	71.00	34.27 ± 4.75	0.535 ± 0.007	63.65 ± 0.55	123.00	9.50 ± 4.04	0.387 ± 0.010	48.50 ± 0.90
20.00	140.08 ± 6.88	0.565 ± 0.010	76.54 ± 0.74	72.00	32.98 ± 4.46	0.522 ± 0.007	63.51 ± 0.52	124.00	9.11 ± 3.76	0.383 ± 0.013	48.83 ± 1.22
21.00	136.29 ± 6.63	0.573 ± 0.009	77.04 ± 0.70	73.00	32.33 ± 4.53	0.525 ± 0.008	63.51 ± 0.62	125.00	9.28 ± 3.76	0.391 ± 0.009	49.89 ± 0.87
22.00	133.96 ± 7.38	0.585 ± 0.009	77.08 ± 0.64	74.00	32.21 ± 4.33	0.531 ± 0.007	62.91 ± 0.54	126.00	8.80 ± 3.94	0.391 ± 0.012	49.89 ± 1.09
23.00	130.77 ± 7.11	0.592 ± 0.009	77.06 ± 0.64	75.00	31.27 ± 4.62	0.531 ± 0.010	62.91 ± 0.81	127.00	8.48 ± 4.04	0.388 ± 0.013	50.58 ± 1.16
24.00	128.30 ± 6.48	0.601 ± 0.008	77.09 ± 0.57	76.00	30.17 ± 4.17	0.529 ± 0.008	62.41 ± 0.63	128.00	7.66 ± 4.12	0.360 ± 0.012	51.12 ± 1.19
25.00	125.14 ± 6.61	0.606 ± 0.008	76.84 ± 0.60	77.00	29.90 ± 4.67	0.529 ± 0.008	60.90 ± 0.58	129.00	7.61 ± 4.19	0.366 ± 0.013	50.41 ± 1.25
26.00	122.33 ± 7.10	0.612 ± 0.006	76.71 ± 0.45	78.00	27.96 ± 4.50	0.502 ± 0.010	60.90 ± 0.78	130.00	6.89 ± 4.00	0.352 ± 0.016	49.69 ± 1.52
27.00	120.39 ± 7.23	0.621 ± 0.007	76.64 ± 0.48	79.00	28.20 ± 4.58	0.512 ± 0.009	59.76 ± 0.69	131.00	6.84 ± 3.97	0.354 ± 0.020	49.14 ± 1.91
28.00	117.09 ± 7.00	0.624 ± 0.007	76.65 ± 0.47	80.00	27.33 ± 4.69	0.509 ± 0.010	60.06 ± 0.78	132.00	6.74 ± 4.22	0.354 ± 0.017	48.76 ± 1.59
29.00	112.23 ± 7.04	0.618 ± 0.005	76.18 ± 0.38	81.00	27.17 ± 4.27	0.514 ± 0.009	60.03 ± 0.67	133.00	6.75 ± 4.05	0.367 ± 0.020	49.97 ± 1.84
30.00	110.22 ± 6.08	0.624 ± 0.005	75.99 ± 0.33	82.00	26.55 ± 4.20	0.514 ± 0.007	59.86 ± 0.57	134.00	6.79 ± 4.05	0.322 ± 0.017	44.45 ± 1.75
31.00	106.17 ± 6.63	0.622 ± 0.005	75.96 ± 0.39	83.00	25.88 ± 4.27	0.509 ± 0.009	59.20 ± 0.71	135.00	6.44 ± 4.24	0.358 ± 0.018	52.43 ± 1.70
32.00	101.86 ± 5.80	0.619 ± 0.004	75.84 ± 0.31	84.00	24.00 ± 4.53	0.482 ± 0.012	59.01 ± 1.00	136.00	6.56 ± 4.05	0.378 ± 0.014	48.02 ± 1.28
33.00	97.96 ± 5.90	0.617 ± 0.004	75.44 ± 0.30	85.00	23.77 ± 4.23	0.482 ± 0.010	57.69 ± 0.86	137.00	6.35 ± 4.16	0.367 ± 0.021	51.28 ± 1.99
34.00	94.84 ± 6.07	0.618 ± 0.006	75.13 ± 0.42	86.00	23.84 ± 4.13	0.491 ± 0.008	57.87 ± 0.65	138.00	6.19 ± 4.31	0.362 ± 0.012	49.25 ± 1.19
35.00	92.51 ± 6.13	0.624 ± 0.006	75.00 ± 0.44	87.00	23.32 ± 4.11	0.491 ± 0.008	57.87 ± 0.68	139.00	6.02 ± 4.17	0.365 ± 0.013	49.99 ± 1.23
36.00	90.12 ± 6.12	0.624 ± 0.007	74.63 ± 0.47	88.00	23.76 ± 4.03	0.507 ± 0.008	57.69 ± 0.61	140.00	5.48 ± 3.94	0.359 ± 0.022	46.13 ± 2.07
37.00	88.90 ± 6.02	0.630 ± 0.005	74.64 ± 0.34	89.00	23.29 ± 4.12	0.506 ± 0.009	57.02 ± 0.69	141.00	5.45 ± 4.14	0.359 ± 0.022	50.07 ± 2.19
38.00	85.95 ± 5.93	0.624 ± 0.005	74.38 ± 0.34	90.00	21.80 ± 4.31	0.493 ± 0.011	57.88 ± 0.93	142.00	5.02 ± 3.99	0.359 ± 0.021	50.07 ± 2.06
39.00	80.66 ± 6.43	0.604 ± 0.006	74.46 ± 0.47	91.00	21.62 ± 4.20	0.496 ± 0.010	57.75 ± 0.78	143.00	4.72 ± 4.10	0.336 ± 0.023	47.97 ± 2.35
40.00	76.65 ± 5.59	0.587 ± 0.006	73.99 ± 0.43	92.00	21.86 ± 4.24	0.509 ± 0.010	58.51 ± 0.77	144.00	4.95 ± 4.19	0.356 ± 0.023	53.54 ± 2.25
41.00	74.70 ± 4.98	0.586 ± 0.006	73.61 ± 0.46	93.00	20.61 ± 4.38	0.477 ± 0.011	56.92 ± 0.91	145.00	5.49 ± 4.17	0.391 ± 0.017	49.83 ± 1.53
42.00	72.40 ± 5.03	0.581 ± 0.005	73.48 ± 0.39	94.00	20.05 ± 4.21	0.476 ± 0.009	56.92 ± 0.73	146.00	5.11 ± 4.11	0.346 ± 0.017	50.54 ± 1.72
43.00	70.44 ± 5.20	0.579 ± 0.005	73.80 ± 0.39	95.00	20.34 ± 4.18	0.489 ± 0.009	56.92 ± 0.77	147.00	4.66 ± 4.06	0.346 ± 0.027	49.98 ± 2.74
44.00	68.44 ± 5.69	0.577 ± 0.005	73.17 ± 0.40	96.00	20.02 ± 4.03	0.489 ± 0.009	56.34 ± 0.74	148.00	4.35 ± 3.93	0.332 ± 0.020	50.52 ± 2.04
45.00	66.55 ± 5.14	0.576 ± 0.006	72.48 ± 0.44	97.00	19.28 ± 4.32	0.489 ± 0.009	56.34 ± 0.74	149.00	4.48 ± 4.32	0.374 ± 0.018	47.20 ± 1.71
46.00	65.03 ± 5.52	0.577 ± 0.006	71.91 ± 0.45	98.00	18.95 ± 4.45	0.491 ± 0.010	56.41 ± 0.78	150.00	3.80 ± 3.91	0.301 ± 0.022	50.56 ± 2.48
47.00	60.70 ± 5.00	0.561 ± 0.009	71.28 ± 0.72	99.00	18.68 ± 4.42	0.473 ± 0.008	55.83 ± 0.69	151.00	4.33 ± 4.01	0.373 ± 0.020	45.26 ± 1.90
48.00	60.40 ± 5.17	0.569 ± 0.007	70.86 ± 0.56	100.00	18.64 ± 4.39	0.477 ± 0.008	55.27 ± 0.65	152.00	4.11 ± 4.22	0.380 ± 0.023	44.61 ± 2.12
49.00	60.26 ± 4.86	0.579 ± 0.005	70.96 ± 0.41	101.00	16.78 ± 3.99	0.461 ± 0.015	54.88 ± 1.22	153.00	4.35 ± 3.93	0.389 ± 0.018	48.84 ± 1.66
50.00	59.15 ± 4.45	0.580 ± 0.006	71.91 ± 0.49	102.00	16.57 ± 4.09	0.461 ± 0.011	54.88 ± 0.93	154.00	3.46 ± 3.95	0.320 ± 0.025	47.43 ± 2.59
51.00	58.14 ± 4.42	0.580 ± 0.004	70.96 ± 0.34	103.00	17.18 ± 4.10	0.479 ± 0.010	54.88 ± 0.81	155.00	3.45 ± 3.83	0.332 ± 0.024	45.62 ± 2.49
52.00	56.79 ± 4.52	0.577 ± 0.005	70.31 ± 0.38	104.00	16.38 ± 4.30	0.461 ± 0.010	52.37 ± 0.83	156.00	3.63 ± 3.91	0.358 ± 0.027	48.09 ± 2.62

Tabella 2.3: Risultato dell'interpolazione di ellipse. Per ciascuna isofota interpolata sono indicati: semiasse maggiore (Col. 1), brillantezza superficiale media (Col. 2), ellitticità (Col. 3), e angolo di posizione (Col. 4), corredate dal proprio errore.

Capitolo 3

Decomposizione fotometrica bidimensionale

In questo capitolo vengono descritti la decomposizione fotometrica bidimensionale e il corrispondente algoritmo GASP2D (Sezione 3.1), i passaggi necessari all'analisi della galassia NGC 4640 (Sezione 3.2) e i risultati ottenuti (Sezione 3.3).

3.1 L'algoritmo GASP2D

Le decomposizioni fotometriche consentono di determinare la distribuzione di luce delle componenti della galassia, quali per esempio sferoide e disco, a partire dall'analisi della brillantezza superficiale osservata dell'oggetto. In letteratura esistono due tipi di decomposizione fotometrica: quella parametrica, in cui si assume che la distribuzione di luce di ciascuna delle componenti possa essere descritta da una espressione analitica che è funzione di due o più parametri, e quella non parametrica, in cui il profilo di ciascuna componente non viene parametrizzato.

La tecnica di decomposizione fotometrica di tipo parametrico bidimensionale ricava i parametri di scala delle componenti della galassia sfruttando la distribuzione di brillantezza superficiale di tutta l'immagine dell'oggetto anziché uno o più profili radiali di brillantezza superficiale (Byun & Freeman 1995, Peng et al. 2002).

Galaxy Surface Photometry 2 Dimensional decomposition (GASP2D) è un algoritmo in IDL di decomposizione fotometrica parametrica bidimensionale, che analizza la distribuzione di brillantezza superficiale della galassia e consente di ricavare i parametri fotometrici delle componenti strutturali che formano la galassia (Méndez-Abreu et al. 2008; 2017).

Esso si basa sull'assunzione che la distribuzione di brillantezza superficiale $I_{\text{galassia}}(x, y)$ della galassia sia data dalla somma dei contributi delle componenti principali dell'oggetto, che possono comprendere un nucleo, uno sferoide, un disco e una barra:

$$I_{\text{galassia}}(x, y) = I_{\text{nucleo}}(x, y) + I_{\text{sferoide}}(x, y) + I_{\text{disco}}(x, y) + I_{\text{barra}}(x, y). \quad (3.1)$$

Le isofote che caratterizzano le componenti galattiche assunte essere di forma ellittica e sono definite dal livello di brillantezza superficiale μ , dalle coordinate del centro (x_0, y_0) , dalla lunghezza dei semiassi maggiore a e minore b , e dall'angolo di posizione del semiasse maggiore PA, calcolato a partire dal Nord del cielo e dal centro in senso antiorario; tali parametri possono variare per ciascuna delle componenti della galassia.

Scegliendo un sistema di coordinate cartesiane (ξ, η, ζ) con l'asse ξ parallelo alla direzione dell'ascensione retta e diretto verso Ovest, l'asse η parallelo alla direzione della declinazione e orientato verso Nord, e l'asse ζ lungo la linea di vista verso l'osservatore, per descrivere la

distribuzione di brillantezza superficiale della componente di sferoide si sceglie il profilo di Sérsic (Sérsic 1968):

$$I_{\text{sferoide}}(\xi, \eta) = I_e 10^{-b_n \left[\left(\frac{r_{\text{sferoide}}(\xi, \eta)}{r_e} \right)^{1/n} - 1 \right]} \quad (3.2)$$

dove r_e è il raggio efficace, ovvero il raggio dell'isofota che racchiude metà della luminosità totale dello sferoide, I_e è la brillantezza superficiale di tale isofota, n è il parametro che descrive la curvatura del profilo, e $b_n = 0.868n - 0.142$ (Caon et al. 1993). Un profilo con indice di Sérsic $n = 1$ corrisponde a un modello esponenziale, mentre un profilo con $n = 4$ corrisponde a un modello $r^{1/4}$ di de Vaucouleurs (de Vaucouleurs 1948). Le isofote dello sferoide si assumono ellittiche e centrate nel centro della galassia (ξ_0, η_0) con angolo di posizione $\text{PA}_{\text{sferoide}}$ e rapporto assiale $q_{\text{sferoide}} = 1 - e_{\text{sferoide}}$ costanti. Il raggio dello sferoide r_{sferoide} è dato da:

$$r_{\text{sferoide}}(\xi, \eta) = \left[\left((\xi - \xi_0) \cos \text{PA}_{\text{sferoide}} + ((\eta - \eta_0) \sin \text{PA}_{\text{sferoide}}) \right)^2 + \left(-(\xi - \xi_0) \sin \text{PA}_{\text{sferoide}} + (\eta - \eta_0) \cos \text{PA}_{\text{sferoide}} \right)^2 / q_{\text{sferoide}}^2 \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

e la luminosità totale è:

$$L_{\text{sferoide}} = 2\pi q_{\text{sferoide}} \int_0^\infty I_{\text{sferoide}}(r) r dr = 2\pi I_e r_e^2 n e^{b_n} q_{\text{sferoide}} \frac{\Gamma(2n)}{b_n^{2n}}, \quad (3.4)$$

dove $\Gamma(2n)$ è la funzione gamma completa (Abramowitz & Stegun 1964). Questa legge è frequentemente usata in letteratura per descrivere la brillantezza superficiale di galassie ellittiche (Capaccioli et al. 1987, Graham & Guzmán 2003), sferoidi di galassie a spirale (Morelli et al. 2016, Costantin et al. 2017), galassie blu compatte (Caon et al. 2005, Amorin et al. 2007) e galassie ellittiche nane (Aguerri et al. 2005, Binggeli & Jerjen 2007).

Per descrivere la distribuzione della brillantezza superficiale del disco si sceglie la legge esponenziale (Freeman 1970):

$$I_{\text{disco}}(\xi, \eta) = I_0 e^{-r_{\text{disco}}/h}, \quad (3.5)$$

dove I_0 è la brillantezza superficiale centrale e h la lunghezza di scala. Si assume che la componente di disco abbia isofote ellittiche centrate nel centro (ξ_0, η_0) , un angolo di posizione PA_{disco} costante e rapporto assiale $q_{\text{disco}} = 1 - e_{\text{disco}}$. Il raggio della componente di disco è dato da:

$$r_{\text{disco}}(\xi, \eta) = \left[\left((\xi - \xi_0) \cos \text{PA}_{\text{disco}} + ((\eta - \eta_0) \sin \text{PA}_{\text{disco}}) \right)^2 + \left(-(\xi - \xi_0) \sin \text{PA}_{\text{disco}} + (\eta - \eta_0) \cos \text{PA}_{\text{disco}} \right)^2 / q_{\text{disco}}^2 \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

e la luminosità totale è:

$$L_{\text{disco}} = 2\pi \int_0^\infty I_{\text{disco}}(r) r dr = 2\pi I_0 h^2. \quad (3.7)$$

Per descrivere la brillantezza superficiale della barra si sceglie la proiezione bidimensionale di un ellissoide di Ferrers (Ferrers 1877, Aguerri et al. 2009):

$$I_{\text{barra}} = I_{0,\text{barra}} \left[1 - \left(\frac{r_{\text{barra}}}{R_{\text{barra}}} \right)^2 \right]^{n_{\text{barra}}+0.5}, \quad (3.8)$$

dove $r_{\text{barra}} \leq R_{\text{barra}}$, $I_{0,\text{barra}}$ rappresenta la brillantezza superficiale centrale, R_{barra} è la lunghezza della barra e n_{barra} il parametro che descrive la curvatura del profilo.

Il raggio r_{barra} viene descritto dalla relazione per le ellissi generalizzate definita da Athanassoula et al. (1990):

$$r_{\text{barra}}(\xi, \eta) = \left[\left| -(\xi - \xi_0) \sin \text{PA}_{\text{barra}} + (\eta - \eta_0) \cos \text{PA}_{\text{barra}} \right|^c + \left| ((\xi - \xi_0) \cos \text{PA}_{\text{barra}} + (\eta - \eta_0) \sin \text{PA}_{\text{barra}}) / q_{\text{barra}} \right|^c \right]^{\frac{1}{c}}, \quad (3.9)$$

dove (ξ_0, η_0) sono le coordinate del centro della galassia, PA_{barra} è l'angolo di posizione delle ellissi generalizzate che compongono la barra, q_{barra} è il rapporto assiale della barra e c è il fattore che determina la forma dell'ellisse generalizzata adottata per descrivere le isofote della barra. Quando $c = 2$ l'isofota risulta essere un'ellisse perfetta, per valori di $c < 2$ è "a disco" mentre per $c > 2$ l'isofota è un'ellisse "a scatola".

Scegliendo i parametri $n_{\text{barra}} = 2$ e $c = 2$, la luminosità totale del profilo della barra di Ferrers è dato da:

$$L_{\text{barra}} = 2\pi \int_0^\infty I_{\text{barra}}(r) r dr = \pi I_{0,\text{barra}} r_{\text{barra}}^2 q_{\text{barra}} \frac{\Gamma(7/2)}{\Gamma(9/2)}. \quad (3.10)$$

L'algoritmo GASP2D è stato scritto in modo tale da minimizzare l'interazione con l'utente e lavora in modo automatico. In questo modo, esso risulta essere molto efficiente nell'ambito di uno studio di campioni costituiti da numerosi oggetti.

Allo scopo di ricavare i parametri fotometrici delle componenti della galassia in esame, GASP2D costruisce un'immagine modello e interpola la brillantezza superficiale $I_{\text{modello}}(\xi, \eta)$ con quella ottenuta dalle osservazioni $I_{\text{galassia}}(\xi, \eta)$ attraverso il metodo dei minimi quadrati non lineari (Bevington & Robinson 2003) e adottando un algoritmo di Levenberg-Marquardt (Moré et al. 1980), in modo tale da ridurre il tempo di calcolo necessario ad ottenere delle stime solide e attendibili dei parametri strutturali della galassia. Per ogni pixel (ξ, η) , i conteggi dei fotoni della galassia osservata $I_{\text{galassia}}(\xi, \eta)$ vengono confrontati con quelli previsti dal modello $I_{\text{modello}}(\xi, \eta)$. Ogni pixel viene pesato in base alla varianza del totale dei conteggi dei fotoni osservati dovuti al contributo sia della galassia $I_{\text{galassia}}(\xi, \eta)$ sia del cielo $I_{i,\text{cielo}}(\xi, \eta)$. Inoltre, ogni pixel viene determinato assumendo come limitazione il rumore di lettura (*Read-Out-Noise*, *RON*) introdotto dall'elettronica del rivelatore. Pertanto, tutti i parametri liberi vengono stimati minimizzando

$$\chi^2 = \sum_{\xi=1}^N \sum_{\eta=1}^M \frac{[I_{\text{modello}}(\xi, \eta) - I_{\text{galassia}}(\xi, \eta)]^2}{I_{\text{galassia}}(\xi, \eta) + I_{i,\text{cielo}}(\xi, \eta) + \text{RON}^2} \quad (3.11)$$

dove N e M sono le dimensioni in pixel dell'immagine.

Il *RON* si calcola tramite la formula:

$$\text{RON} = \sqrt{d} \cdot g \quad (3.12)$$

dove g è il guadagno per ciascun CCD, ovvero il parametro che trasforma il numero di elettroni rilevati dalla camera della SDSS nel numero di conteggi registrati nell'immagine e d è la varianza (*Dark variance*) che descrive i contributi del rumore di lettura e delle correnti oscure della camera CCD.

L'algoritmo confronta iterativamente galassia e modello finché non si ha convergenza, ovvero finché la funzione χ^2 non raggiunge il minimo e la differenza del suo valore tra due iterazioni successive è minore di 10^{-7} . Utilizzando i parametri ottenuti viene costruito un modello della distribuzione della brillantezza superficiale.

Poiché l'immagine della galassia è affetta dagli effetti dovuti alla configurazione strumentale e alla turbolenza atmosferica, il modello viene convoluto con una PSF circolare moffattiana bidimensionale, la cui *FWHM* è stata determinata dall'analisi delle stelle di campo (Sezione

2.3.3), calcolo che viene effettuato prima della misura di χ^2 tramite l'algoritmo di *Fast Fourier Transform* (FFT) nel dominio dell'analisi di Fourier oppure calcolando l'integrale di convoluzione.

Inoltre, poiché l'algoritmo GASP2D si basa sulla minimizzazione del χ^2 , è fondamentale adottare dei valori iniziali per i parametri liberi che siano il più possibile vicini ai valori reali. Per questo motivo, è importante interpolare le isofote della galassia con la procedura *ellipse* di IRAF (Sezione 2.3.4) prima di avviare la procedura GASP2D, in modo tale che l'algoritmo possa utilizzarne i risultati.

Il modello della distribuzione di brillantezza superficiale della galassia $I_{\text{modello}}(\xi, \eta)$ viene costruito usando i parametri interpolati, viene convoluto con la PSF adottata e infine sottratto dall'immagine osservata per ottenere l'immagine dei residui.

3.2 Configurazione di GASP2D

Per il funzionamento di GASP2D, operativamente è necessario modellare le isofote della galassia con *ellipse* di IRAF (Sezione 2.3.4), quindi aver cura di compilare i *file* necessari per lanciare GASP2D attraverso IDL, ovvero `images.txt` e `fitting_file.txt`. Nel primo, si inseriscono il nome dell'immagine da fornire come *input* all'algoritmo e le coordinate del centro della galassia, in questo caso $(x, y) = (201.43 \text{ pixel}, 201.76 \text{ pixel})$.

Il `fitting_file` permette all'utente di interagire con l'algoritmo inserendo alcuni parametri necessari al suo funzionamento ricavati nel Capitolo 2 e selezionando le leggi parametriche e i relativi parametri per descrivere le componenti galattiche. Per iniziare, si fissano a zero le coordinate del centro della galassia, in quanto l'algoritmo sposta l'immagine di *input* in modo tale da centrarla sullo zero, si seleziona PSF di tipo Moffattiano (Equazione 2.6) inserendone i parametri β e *FWHM* ottenuti nella Sezione 2.3.3:

```
X coordinate of the center
0
Y coordinate of the center
0
If you want a Gaussian PSF → 0 if prefer a Moffat PSF → 1 or an image → 2
1
If you select a Moffat function, enter the beta parameter, if not → 0
4.94
Seeing FWHM
3.05
```

Per il calcolo del RON tramite l'Equazione 3.12, occorre ricavare *Gain* e *Dark variance* tabulati dalla SDSS consultando l'apposito indirizzo¹: i parametri contenuti nelle tabelle sono suddivisi per banda e numero di colonna della camera (*camcol*). Il nome dell'immagine acquisita dalla SDSS DR16 nella Sezione 2.2, ovvero `frame-i-003063-3-0072.fits`, indica che occorre consultare la riga numero tre e la colonna corrispondente alla banda *i* delle tabelle:

- *Gain for each CCD*: $g_i = 4.86$ elettroni conteggi⁻¹;
- *Dark variance for each CCD*: $d_i = 4.6225$ conteggi.

¹https://data.sdss.org/datamodel/files/BOSS_PHOTOOBJ/frames/RERUN/RUN/CAMCOL/frame.html

Il RON si ricava dall'Equazione 3.12 e, effettuando il calcolo tramite IDL, risulta essere $RON = 10.45$ elettroni. I successivi parametri da inserire sono il valor medio della brillantezza superficiale del cielo ottenuto al termine della procedura di `sky.py` e valutato con `imexamine`, $I_{i,\text{cielo}} = 0.0$ conteggi pixel^{-1} , e il corrispondente scarto quadratico medio calcolato nella Sezione 2.3.2 a partire dai valori ottenuti da `imexamine` di IRAF, $\sigma_{i,\text{cielo}} = 4.90$ conteggi pixel^{-1} .

```
Readout noise (e-)
10.4490
Gain (e-/ADU)
4.86
Sky values (counts)
0.0
Sky sigma (counts)
4.8994
```

Una volta forniti al programma i parametri di calibrazione, si procede selezionando le tre componenti principali di NGC 4640, ovvero lo sferoide, il disco e la barra:

```
Fit the bulge (0 → no, 1 → yes)
1
Fit the disk (0 → no, 1 → yes)
1
Fit the bar (0 → no, 1 → yes)
1
```

L'algoritmo GASP2D permette all'utente di scegliere quali parametri dello sferoide fissare oppure far variare; in questo caso si è scelto di lasciar variare tutti i parametri:

```
Bulge effective intensity (0 → fixed 1 → variable)
1
Bulge effective radius (0 → fixed 1 → variable)
1
Bulge Sérsic parameter n (0 → fixed 1 → variable)
1
Bulge ellipticity (0 → fixed 1 → variable)
1
Bulge PA (0 → fixed 1 → variable)
1
```

Come per lo sferoide, per il disco è possibile scegliere quali parametri fissare e anche in questo caso sono stati tutti indicati come variabili:

```

Disk central intensity (0 → fixed 1 → variable)
1
Disk scale length (0 → fixed 1 → variable)
1
Disk ellipticity (0 → fixed 1 → variable)
1
Disk PA (0 → fixed 1 → variable)
1
Disk break radius (0 → fixed 1 → variable)
1

```

Per la barra, invece, si è scelto di tenere costanti i parametri c , scegliendo $c = 2$ affinché le isofote risultassero perfettamente ellittiche, e n_{barra} scegliendo $n_{\text{barra}} = 2$, in quanto tale parametro introduce un alto grado di degenerazione nello spazio dei parametri (Laurikainen et al. 2005, Méndez-Abreu et al. 2017).

```

Fit the bar (0 → no, 1 → yes)
1
Select the model for the bar (0 → Ferrers, 1 → Flat, 0 → Elliptical)
0
Bar central intensity (0 → fixed 1 → variable)
1
Bar length (0 → fixed 1 → variable)
1
Bar ellipticity (0 → fixed 1 → variable)
1
Bar PA (0 → fixed 1 → variable)
1
Bar generalized ellipse shape parameter  $C$  (0 → fixed 1 → variable)
0

```

Infine, si è scelto di mantenere costanti le coordinate del centro della galassia contenute nel file `images.txt`, attraverso i comandi:

```

galaxy X center (0 → fixed 1 → variable)
0
galaxy Y center (0 → fixed 1 → variable)
0

```

L'ultima parte del `fitting_file.txt` permette all'utente di inizializzare il comando IRAF `ellipse` direttamente tramite GASP2D: questa possibilità fornisce un notevole vantaggio nello studio di campioni di galassie molto numerosi. In questo caso, l'interpolazione delle isofote della galassia NGC 4640 è stata fatta nella Sezione 2.3.4, pertanto non è stato lanciato il comando attraverso l'algoritmo di decomposizione. Tuttavia, occorre permettere all'algoritmo di lanciare `ellipse` sulle immagini del modello per poterle analizzare:


```

Do you want to run ellipse? (0 → no 1 → yes)
0
Do you want to run the ellipse fitting automatical? (0 → no 1 → yes)
0
Do you want to perform ellipse fitting on the model images? (0 → no 1 → yes)
1

```

GASP2D permette di scegliere la funzione di Poisson, che descrive le incertezze all'interno di ciascun pixel (Wadadekar et al. 1999, MacArthur et al. 2003), come metodo di calcolo di χ^2 :

```

Do you want to weight the fit points? (0 → Poisson, 1 → Constant)
0

```

Infine, per l'interpolazione bidimensionale si imposta il raggio di interpolazione automatico e il raggio massimo di interpolazione, che coincide con la lunghezza massima del semiasse maggiore della galassia (presente nella Sezione 2.3.4), in modo che l'algoritmo consideri tutti i pixel all'interno di tale raggio:

```

Do you want to use an automatical → 0 or fixed → 1 maximum fitting radius?
0
Maximum fitting radius
156

```

3.3 Applicazione di GASP2D e risultati

Una volta impostati i parametri nel `fitting_file.txt` si può avviare GASP2D attraverso il terminale di IDL. Per prima cosa, occorre inizializzare le procedure `setup` e `gasp2d_startup.pro` attraverso il comando di lettura di IDL `.r`; dopodiché si procede con la lettura della procedura di avvio dell'algoritmo attraverso i comandi `.r gasp2d` e `gasp2d`.

Una volta conclusa l'interpolazione, il programma crea i *file* `2Dfit.dat` e `2Dfit.fits`, che contengono i risultati numerici e grafici dell'interpolazione, e `2Dfit_cal.dat`, che contiene i risultati calibrati. Per poter visualizzare il risultato di GASP2D, occorre inizializzare l'apposita procedura attraverso `.r grafico_v3.pro` e `grafico` scritta da Jairo Méndez-Abreu e adattata da Virginia Cuomo, inserendo il nome della galassia NGC 4640, la sua distanza $D = 27.4 \cdot 10^6$ pc e il parametro di calibrazione $\mu_0 = 25.94$ mag arcsec⁻² ricavato nella Sezione 2.3.1, necessari per calibrare i risultati, cioè a convertire le misure di lunghezza in kpc e quelle di brillantezza superficiale in mag arcsec⁻².

Il risultato grafico dell'interpolazione di GASP2D è riportato in Figura 3.1.

La valutazione degli errori sui parametri strutturali fotometrici viene fatta attraverso un confronto tra i parametri calcolati da GASP2D per la galassia in esame e quelli calcolati da Jairo Méndez-Abreu su un campione di circa 100 galassie simulate con metodo Monte Carlo (Méndez-Abreu et al. 2017). Le galassie-modello sono state costruite tenendo conto di:

1. configurazione strumentale caratteristica della SDSS;
2. combinazioni di strutture quali sferoide, disco, barra, ecc.;
3. intervallo di magnitudini apparenti delle galassie.

Sferoide	
μ_e	$25.738 \pm 0.003 \text{ mag arcsec}^{-2}$
r_e	$79.42 \pm 2.73 \text{ arcsec}$
n	4.04 ± 0.10
q_{sferoide}	0.49 ± 0.01
$\text{PA}_{\text{sferoide}}$	$92^\circ.82 \pm 0^\circ.94$
$L_{\text{sferoide}}/L_{\text{T}}$	0.17
Disco	
μ_0	$20.82 \pm 0.08 \text{ mag arcsec}^{-2}$
h	$20.82 \pm 0.15 \text{ arcsec}$
q_{disco}	0.418 ± 0.002
PA_{disco}	$58^\circ.01 \pm 0^\circ.12$
$L_{\text{disco}}/L_{\text{T}}$	0.79
Barra	
μ_{barra}	$21.827 \pm 0.007 \text{ mag arcsec}^{-2}$
R_{barra}	$27.02 \pm 0.06 \text{ arcsec}$
q_{barra}	0.222 ± 0.001
PA_{barra}	$76^\circ.91 \pm 0^\circ.07$
$L_{\text{barra}}/L_{\text{T}}$	0.04

Tabella 3.1: Parametri strutturali fotometrici di sferoide, disco e barra ottenuti dalla decomposizione fotometrica di NGC 4640 con GASP2D.

In questo modo, la collezione di galassie simulate è in grado di riprodurre la varietà della popolazione di galassie presente in cielo.

Dopodiché è stata fatta la decomposizione fotometrica di ciascuna galassia del campione, studiando la distribuzione dei parametri fotometrici e calcolandone valore medio e deviazione standard. Per ogni parametro in esame, la differenza tra il valore medio ottenuto con le galassie simulate e il valor medio ottenuto per le galassie osservate in cielo rappresenta l'errore sistematico σ_{sist} e la deviazione standard l'errore statistico σ_{stat} .

Per ciascuna distribuzione delle galassie simulate, è stato creato un *file* contenente:

- l'intervallo di magnitudine totale apparente nella banda SDSS adottata, in questo caso la banda i ;
- le componenti strutturali;
- gli errori sistematico σ_{sist} e statistico σ_{stat} per ogni parametro di ciascuna componente.

Infine, la procedura IDL `gasp2d_err_MOD.pro` scritta da Ilaria Pagotto legge il file di *output* di GASP2D, chiamato `2Dfit.dat`, e

1. ai parametri calcolati dall'algoritmo associa gli errori sistematico e statistico della galassia simulata;
2. calcola la somma in quadratura dei due errori, $\sigma^2 = \sigma_{\text{sist}}^2 + \sigma_{\text{stat}}^2$, e li abbina ai parametri corrispondenti.

La Tabella 3.1 riporta i parametri strutturali fotometrici della galassia NGC 4640 calcolati con l'algoritmo GASP2D e corredati dai relativi errori ottenuti dalla procedura `gasp2d_err_MOD.pro`.

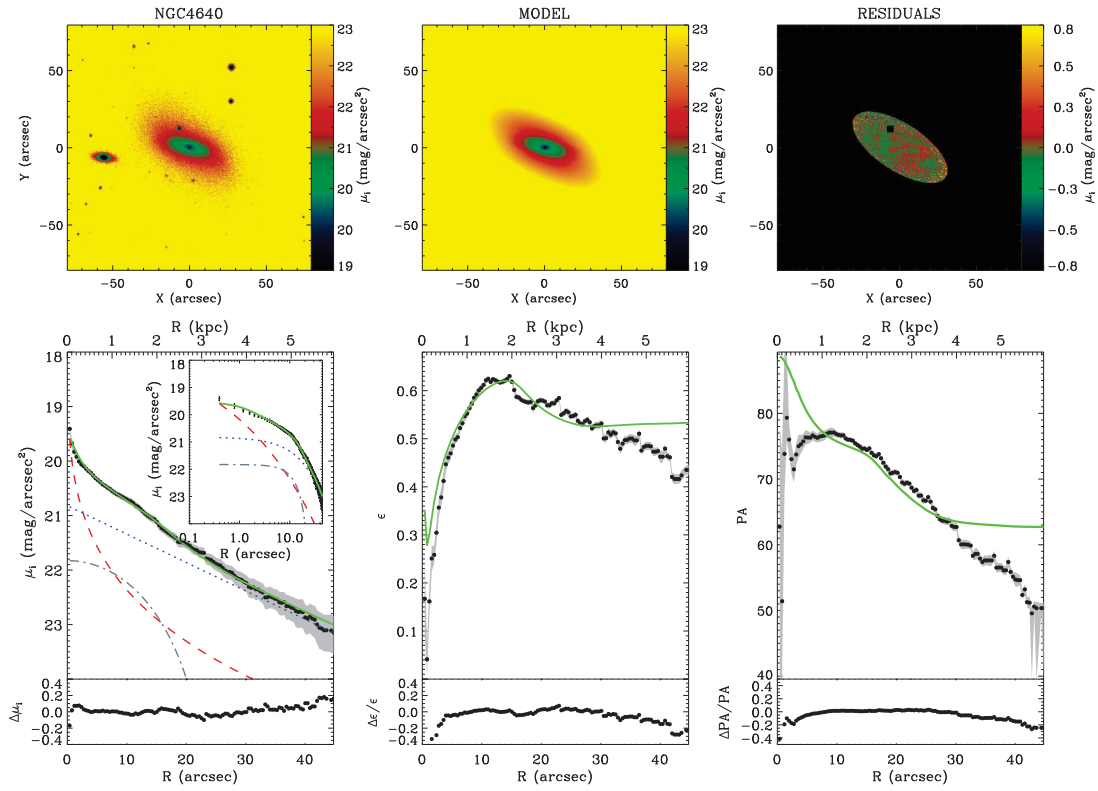


Figura 3.1: Decomposizione fotometrica bidimensionale dell’immagine in banda i della galassia NGC 4640 ricavata dalla SDSS DR16, ottenuta con GASP2D. I riquadri superiori (da sinistra verso destra) mostrano la mappa osservata, il modello e i residui (immagine osservata – modello) della distribuzione di brillantezza superficiale. Il campo di vista è orientato con il Nord in alto e l’Est a sinistra. Le aree nere nell’immagine dei residui corrispondono ai pixel non considerati nel modello. I riquadri inferiori riportano (da sinistra a destra) i profili radiali di brillantezza superficiale, ellitticità e angolo di posizione misurati nell’immagine osservata (punti neri con barre d’errore grigie) e nel modello convoluto con la PSF (riga verde continua) e la loro corrispondente differenza. Inoltre, nel primo riquadro in basso a sinistra, vengono presentati i profili dello sferoide (riga tratteggiata rossa) e del disco (riga punteggiata blu) che vanno a costruire il modello. Infine viene presentato il profilo di brillantezza superficiale in cui la distanza dal centro è in scala logaritmica.

Capitolo 4

Risultati e conclusioni

In questo capitolo viene confrontata la misura della lunghezza della barra ottenuta con GASP2D con quella ricavata tramite l'analisi di Fourier (Sezione 4.1), viene presentato il calcolo del tasso di rotazione della barra della galassia NGC 4640 e sono discusse le conclusioni di questo progetto di tesi (Sezione 4.2).

4.1 Risultati

Dall'archivio della SDSS DR16 (Ahumada et al. 2020) è stata ricavata l'immagine in banda i della galassia NGC 4640, una galassia lenticolare nana barrata che si trova ad una distanza di 27.4 Mpc ed è osservata in direzione dell'Ammasso della Vergine. Dopo aver ricavato la stima del valore residuo del cielo e aver interpolato le isofote della galassia, è stata fatta la decomposizione fotometrica di NGC 4640 attraverso l'algoritmo GASP2D (Méndez-Abreu et al. 2008; 2017). Questa tecnica ha consentito di ricavare i parametri strutturali fotometrici di NGC 4640 e in particolare la misura della lunghezza della barra, che è risultata essere $R_{\text{GASP2D}} = 27.0 \pm 0.1$ arcsec.

La misura della lunghezza della barra ricavata dalla decomposizione fotometrica bidimensionale può essere confrontata con una seconda stima ottenuta con il metodo dell'analisi di Fourier descritto in Aguerri et al. (2009). Tale metodo consiste nel descrivere il profilo di luminosità azimutale deproiettato della galassia attraverso una serie di Fourier. Tipicamente, la presenza della barra in una galassia è associata a un massimo locale della componente $m = 2$ della serie di Fourier, mentre l'angolo di fase di tale componente si mantiene costante nella regione della barra. In particolare, la lunghezza della barra viene calcolata utilizzando il metodo del rapporto tra le intensità delle regioni della barra e dell'interbarra (Aguerrri et al. 2000). L'analisi di Fourier è stata applicata da Virginia Cuomo (comunicazione privata) e ha portato a una misura di lunghezza della barra pari a $R_{\text{Fourier}} = 30.2 \pm 3.6$ arcsec. I valori ottenuti dai due metodi sono quindi compatibili tra loro entro le barre di errore.

La Figura 4.1 mostra il risultato dell'applicazione dell'analisi di Fourier sull'immagine in banda i della galassia NGC 4640.

Il valore finale della lunghezza della barra è fissato pari alla media del valore ottenuto dalla decomposizione fotometrica e di quello fornito dall'analisi di Fourier:

$$R_{\text{barra}} = \frac{R_{\text{GASP2D}} + R_{\text{Fourier}}}{2} = 28.6 \text{ arcsec.} \quad (4.1)$$

Gli errori inferiore e superiore di lunghezza della barra, inoltre, vengono stimati dalla massima ampiezza della variazione dei valori utilizzati nella media. Operativamente si ha:

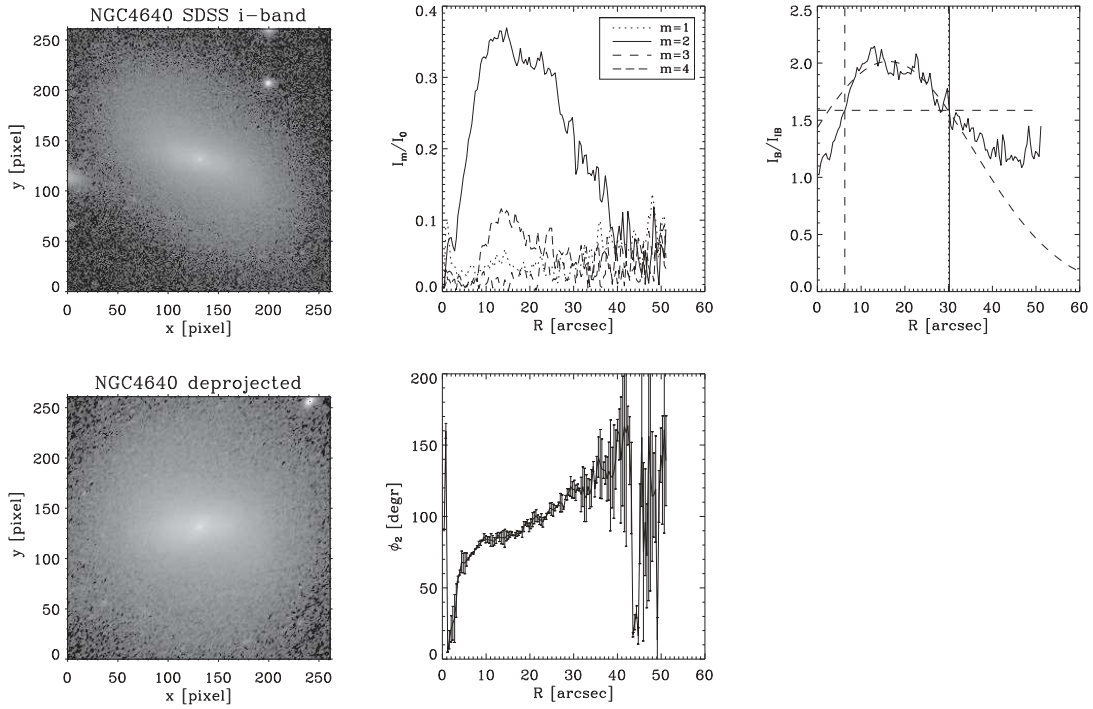


Figura 4.1: *Riquadro in alto a sinistra*: immagine in banda i di NGC 4640 sottratta di cielo. *Riquadro in basso a sinistra*: immagine in banda i di NGC 4640 sottratta di cielo e deproiettata. *Riquadro centrale in alto*: andamento dei profili radiali delle componenti della serie di Fourier. *Riquadro centrale in basso*: profilo dell'angolo di fase ϕ con relative barre di errore. *Riquadro in alto a destra*: profilo radiale del rapporto tra le intensità della barra e interbarra. La riga verticale indica la misura della lunghezza della barra (Virginia Cuomo, comunicazione privata).

- $\sigma_{\text{sup}} = |R_{\text{barra}} - R_{\text{sup}}| = 5.2$ arcsec come stima dell'errore superiore;
- $\sigma_{\text{inf}} = |R_{\text{barra}} - R_{\text{inf}}| = 2.1$ arcsec come stima dell'errore inferiore.

In conclusione, la misura della lunghezza della barra è $R_{\text{barra}} = 28.6^{+5.2}_{-2.1}$ arcsec che corrisponde a $3.8^{+0.7}_{-0.3}$ kpc.

4.2 Discussione e conclusioni

Per calcolare la velocità angolare della barra Ω_{barra} Virginia Cuomo (comunicazione privata) ha applicato il metodo Tremaine-Weinberg alla galassia NGC 4640 utilizzando i dati di spettroscopia a campo integrale ottenuti con lo strumento MUSE. Inoltre, applicando una correzione di *asymmetric drift* al campo di velocità stellare della regione del disco di NGC 4640 ottenuto con gli stessi dati MUSE, sono state misurate la velocità circolare $V_{\text{circ}} = 39.0 \pm 12.0$ km s⁻¹ e la velocità angolare $\Omega_{\text{barra}} = 3.0 \pm 1.9$ km s⁻¹ arcsec⁻¹ = 22.6 ± 14.3 km s⁻¹ kpc⁻¹. Con questi parametri si calcola il raggio di corotazione R_{cr} tramite la relazione:

$$R_{\text{cr}} = \frac{V_{\text{circ}}}{\Omega_{\text{barra}}} \quad (4.2)$$

Galassia	R_{barra} [arcsec]	Ω_{barra} [km s ⁻¹ arcsec ⁻¹]	V_{circ} [km s ⁻¹]	\mathcal{R}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
NGC 4640	$28.6^{+5.2}_{-2.1}$	3.0 ± 1.9	39.0 ± 12.0	$0.5^{+0.7}_{-0.2}$

Tabella 4.1: Parametri utilizzati per il calcolo del tasso di rotazione della barra \mathcal{R} : (Col. 1) nome della galassia, (Col. 2) lunghezza della barra (Sezione 4.1), (Col. 3) tasso di velocità della barra, (Col. 4) velocità circolare della barra e (Col. 5) tasso di rotazione della barra.

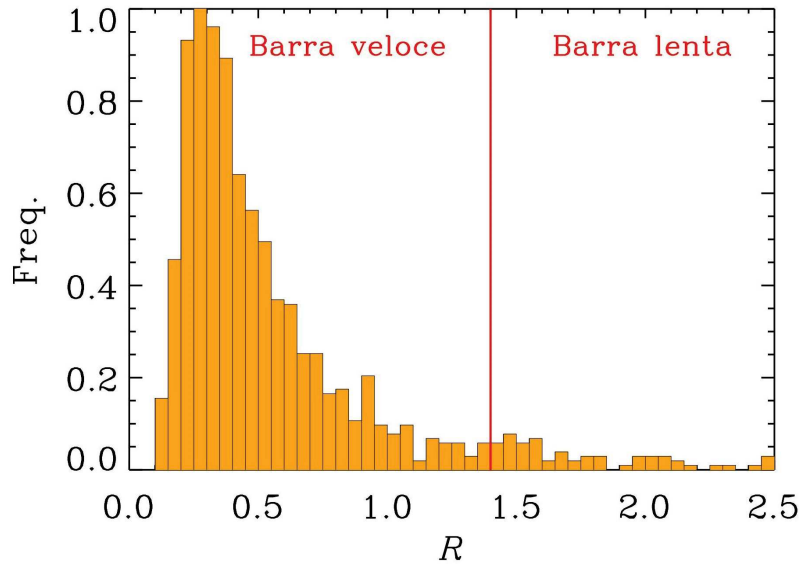


Figura 4.2: Distribuzione dei valori del tasso di rotazione \mathcal{R} della barra della galassia NGC 4640 ottenuto attraverso simulazioni Monte Carlo. La linea rossa verticale separa la regione dominata dal regime di rotazione veloce da quella dominata dal regime lento (Virginia Cuomo, comunicazione privata).

che fornisce il valore $R_{\text{cr}} = 13.0$ arcsec. Una volta calcolato il raggio di corotazione si ricava il tasso di rotazione della barra di NGC 4640 attraverso l'equazione:

$$\mathcal{R} = \frac{R_{\text{cr}}}{R_{\text{barra}}} \quad (4.3)$$

che per NGC 4640 risulta essere $\mathcal{R} = 0.5$.

Infine, gli errori associati al tasso di rotazione della barra sono stati calcolati da Virginia Cuomo attraverso una simulazione Monte Carlo a 10000 ripetizioni, ottenendo la distribuzione riportata nella Figura 4.2. Nella Tabella 4.1 sono invece riportate le misure ricavate dal metodo Tremaine-Weinberg e dalle simulazioni Monte Carlo.

Il valore del tasso di rotazione della barra di NGC 4640 è $\mathcal{R} = 0.5^{+0.7}_{-0.2}$. Questa analisi rappresenta la seconda misura di velocità angolare Ω_{barra} e tasso di rotazione \mathcal{R} della barra in una galassia nana, per la prima volta ottenuta con i dati di MUSE a spettroscopia a campo integrale. Essi hanno consentito di concludere che entro l'errore superiore la barra di NGC 4640 è compatibile con il regime di rotazione veloce e che la sua formazione è probabilmente dovuta a processi interni piuttosto che all'interazione con altri membri dell'Ammasso della Vergine.

Bibliografía

- Abramowitz, M. & Stegun, I. A. 1964, Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables (Dover, New York)
- Adams, J. J., Simon, J. D., Fabricius, M. H., et al. 2014, ApJ, 789, 63
- Aguerri, J., Munoz-Tunón, C., Varela, A., & Prieto, M. 2000, A&A, 361, 841
- Aguerri, J. A. L., Elias-Rosa, N., Corsini, E. M., & Muñoz-Tuñón, C. 2005, A&A, 434, 109
- Aguerri, J. A. L., Méndez-Abreu, J., & Corsini, E. M. 2009, A&A, 495, 491
- Ahumada, R., Prieto, C. A., Almeida, A., et al. 2020, AJS, 249, 3
- Amorin, R. O., Munoz-Tunón, C., Aguerri, J. A. L., Cairós, L. M., & Caon, N. 2007, A&A, 467, 541
- Athanassoula, E. 1992, MNRAS, 259, 345
- Athanassoula, E. 2003, MNRAS, 341, 1179
- Athanassoula, E., Machado, R. E., & Rodionov, S. 2013, MNRAS, 429, 1949
- Athanassoula, E., Morin, S., Wozniak, H., et al. 1990, MNRAS, 245, 130
- Bacon, R., Accardo, M., Adjali, L., et al. 2010, in Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III, Vol. 7735, SPIE, 131
- Barazza, F. D., Binggeli, B., & Jerjen, H. 2002, A&A, 391, 823
- Bevington, P. R. & Robinson, D. K. 2003, Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences (McGraw-Hill, Boston)
- Binggeli, B. & Jerjen, H. 2007, A&A, 333, 17
- Binggeli, B., Sandage, A., & Tammann, G. A. 1985, AJ, 90, 1681
- Bland-Hawthorn, J. & Gerhard, O. 2016, ARAA, 54, 529
- Buta, R. J., Sheth, K., Athanassoula, E., et al. 2015, ApJSS, 217, 32
- Byun, Y. I. & Freeman, K. C. 1995, ApJ, 448, 563
- Caon, N., Cairós, L. M., Aguerri, J. A. L., & Muñoz-Tuñón, C. 2005, ApJS, 157, 218
- Caon, N., Capaccioli, M., & D'onofrio, M. 1993, MNRAS, 265, 1013
- Capaccioli, M., Held, E. V., & Nieto, J. L. 1987, AJ, 94, 1519
- Choque-Challapa, N., Aguerri, J. A. L., Mancera Piña, P. E., et al. 2021, MNRAS, 507, 6045
- Corsini, E., Aguerri, J. A. L., Debattista, V. P., et al. 2007, ApJ, 659, L121

- Corsini, E. M. 2011, *MSAIS*, 18, 23
- Costantin, L., Méndez-Abreu, J., Corsini, E. M., et al. 2017, *A&A*, 601, A84
- Cuomo, V., Aguerri, J. A. L., Corsini, E. M., & Debattista, V. P. 2020, *A&A*, 641, A111
- Cuomo, V., Corsini, E., Aguerri, J., et al. 2019, *MNRAS*, 488, 4972
- de Vaucouleurs, G. 1948, in *Ann. Astrop.*, Vol. 11, 247
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin Jr, H. G., et al. 1991, *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (RC3)* (Springer-Verlag, New York)
- Debattista, V. P. & Sellwood, J. 2000, *ApJ*, 543, 704
- Ferrers, N. M. 1877, *Q. J. Pure Appl. Math.*, 14, 1
- Fixsen, D., Cheng, E., Gales, J., et al. 1996, *AJ*, 473, 576
- Freeman, K. C. 1970, *ApJ*, 160, 811
- Fukugita, M., Shimasaku, K., Ichikawa, T., Gunn, J. E., et al. 1996, *AJ*, 111, 1748
- Gómez-López, J. A., Amram, P., Epinat, B., et al. 2019, *A&A*, 631, A71
- Graham, A. W. & Guzmán, R. 2003, *AJ*, 125, 2936
- Gunn, J. E., Carr, M., Rockosi, C., et al. 1998, *AJ*, 116, 3040
- Gunn, J. E., Siegmund, W. A., Mannery, E. J., et al. 2006, *AJ*, 131, 2332
- Impey, C., Sprayberry, D., Irwin, M., & Bothun, G. 1996, *ApJSS*, 105, 209
- James, P. A. & Percival, S. M. 2016, *MNRAS*, 457, 917
- Janz, J., Laurikainen, E., Lisker, T., et al. 2014, *ApJ*, 786, 105
- Kollmeier, J., Anderson, S. F., Blanc, G. A., et al. 2019, *BAAS*, 51, 274
- Kwak, S., Kim, W.-T., Rey, S.-C., & Kim, S. 2017, *ApJ*, 839, 24
- Laurikainen, E., Salo, H., & Buta, R. 2005, *MNRAS*, 362, 1319
- Lisker, T., Glatt, K., Westera, P., & Grebel, E. K. 2006, *ApJ*, 132, 2432
- Lisker, T., Weinmann, S. M., Janz, J., & Meyer, H. T. 2013, *MNRAS*, 432, 1162
- Łokas, E., Athanassoula, E., Debattista, V. P., et al. 2014, *MNRAS*, 445, 1339
- Łokas, E. L. 2018, *ApJ*, 857, 6
- MacArthur, L. A., Courteau, S., & Holtzman, J. A. 2003, *AJ*, 582, 689
- Martinez-Valpuesta, I., Aguerri, J. A. L., González-García, A. C., Dalla Vecchia, C., & Stringer, M. 2016, *MNRAS*, 464, 1502
- McConnachie, A. W. 2012, *AJ*, 144, 4
- Méndez-Abreu, J., Aguerri, J. A. L., Corsini, E. M., & Simonneau, E. 2008, *A&A*, 478, 353
- Méndez-Abreu, J., Ruiz-Lara, T., Sánchez-Menguiano, L., et al. 2017, *A&A*, 598, A32
- Michea, J., Pasquali, A., Smith, R., et al. 2021, *AJ*, 161, 268
- Moffat, A. F. J. 1969, *A&A*, 3, 455

- Moré, J. J., Garbow, B. S., & Hillstrom, K. E. 1980, User Guide for MINPACK-1, Tech. rep., Argonne Nat. Lab. Report
- Morelli, L., Parmiggiani, M., Corsini, E. M., et al. 2016, MNRAS, 463, 4396
- Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. 1997, ApJ, 490, 493
- Nilson, P. 1973, Uppsala General Catalogue of Galaxies (UGC) (Astronomiska Observatorium, Uppsala)
- Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H. W. 2002, AJ, 124, 266
- Peters, W. & Kuzio de Naray, R. 2019, MNRAS, 484, 850
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. 1992, Numerical Recipes in FORTRAN. The Art of Scientific Computing (Cambridge University Press, Cambridge)
- Rautiainen, P., Salo, H., & Laurikainen, E. 2008, MNRAS, 388, 1803
- Relatores, N. C., Newman, A. B., Simon, J. D., et al. 2019, ApJ, 887, 94
- Sérsic, J. 1968, Atlas de Galaxias Australes (Observatorio Astronomico, Cordoba)
- Toloba, E., Boselli, A., Peletier, R., et al. 2012, A&A, 548, A78
- Tremaine, S. & Weinberg, M. D. 1984, ApJ, 282, L5
- Trentham, N. & Hodgkin, S. 2002, MNRAS, 333, 423
- Venhola, A., Peletier, R., Laurikainen, E., et al. 2018, A&A, 620, A165
- Vorontsov-Velyaminov, B. A., Krasnogorskaja, A. A., & Arkhipova, V. P. 1962, The Morphological Catalogue of Galaxies (MCG) (Moscow State University, Moscow)
- Wadadekar, Y., Robbason, B., & Kembhavi, A. 1999, AJ, 117, 1219
- York, D. G., Adelman, J., Anderson Jr, J. E., et al. 2000, AJ, 120, 1579
- Zwicky, F., Herzog, E., Wild, P., Karpowicz, M., & Kowal, C. 1961, Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies (CGCG) (California Institute of Technology, Pasadena)