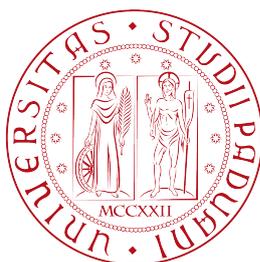


Università degli Studi di Padova

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
“Galileo Galilei”



Tesi di Laurea Triennale in Astronomia

**DUE POPOLAZIONI STELLARI
IN CONTROROTAZIONE
NELLA GALASSIA S0 NGC 1366**

Relatore:
Prof. Alessandro Pizzella

Candidato:
Marco Rocco

Correlatore:
Dott. Lorenzo Morelli

Anno Accademico 2014-2015

Abstract *La tesi si occupa di verificare la presenza del fenomeno cinematico di controrotazione relativamente alla galassia S0 NGC 1366. In particolare si verifica l'esistenza di due distinte popolazioni stellari controrotanti, disaccoppiate rispetto al disco di gas ionizzato, e le si caratterizza in termini di età e metallicità. A questo scopo si utilizzano dati di spettroscopia lungo l'asse maggiore della galassia e si trova che la componente stellare principale risulta di poco più vecchia rispetto alla componente controrotante, caratterizzata dalla medesima metallicità subsolare e da un minore α -enhancement. Da queste evidenze si ipotizza uno scenario di formazione esterno per il fenomeno controrotatorio (acquisizione di materiale gassoso dall'ambiente circostante o merging) e lo si confronta con simili casi già rilevati in altre cinque galassie, trovando risultati analoghi.*

Indice

1	Introduzione	7
1.1	Controrotazione	7
1.2	Metodi d'indagine	8
1.3	Statistica ambientale e morfologica	9
1.4	Scenari di formazione	11
2	Analisi dei dati	13
2.1	NGC 1366	13
2.2	Osservazione e riduzione dati	14
2.3	Analisi e risultati	15
2.3.1	Fit a singola componente	15
2.3.2	Fit a doppia componente	16
2.4	Discussione dei risultati	22
3	Discussione e conclusioni	25
3.1	NGC 3593	25
3.2	NGC 4138	26
3.3	NGC 4191	27
3.4	NGC 4550	28
3.5	NGC 5719	30
3.6	Conclusioni	30
4	Appendice	33
	Bibliografia	39

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Controrotazione

In generale, la cinematica di una galassia è determinata dalle orbite del corpo stellare e del gas ionizzato; tuttavia, la descrizione può divenire più complessa se coesistono più dischi stellari che co-ruotano o contro-ruotano gli uni rispetto agli altri e rispetto al disco di gas.

In particolare, le galassie con evidenze di controrotazione appartengono alla classe delle galassie a *multi-spin*, ossia oggetti caratterizzati dalla presenza di due componenti cospaziali che si osservano in rotazione in direzioni opposte l'una rispetto all'altra (per una discussione su tale argomento si veda Rubin 1994, ove viene trattata da un punto di vista storico la ricerca di peculiarità in cinematica galattica).

Chiaramente, il fenomeno può palesarsi in tre diverse forme a seconda delle componenti galattiche interessate dalla controrotazione; ossia si può parlare di:

- controrotazione di gas contro stelle (controrotazione gassosa), se il disco di gas contro-ruota rispetto al corpo stellare della galassia come nel caso di NGC 4546, galassia SB0/SBa dove gas ionizzato, molecolare ed atomico contro-ruotano rispetto alle stelle (Galletta 1987, che storicamente fu il primo articolo in cui si diede evidenza del fenomeno);
- controrotazione di gas contro gas, come nella galassia S0 7332, analizzata in Fisher et al. 1994;
- controrotazione di stelle contro stelle (controrotazione stellare), cioè il caso trattato nella presente tesi, che si andrà a confrontare con altri cinque simili casi per la galassie NGC 3593 (analizzata in Bertola et al. 1996 e Coccato et al. 2012, si veda anche Fig. 1.1), NGC 4138

(Pizzella et al. 2014), NGC 4191 (Coccatto et al. 2015), NGC 4550 (Johnston et al. 2013, Coccatto et al. 2012) ed NGC 5719 (Coccatto et al. 2011), considerando che tutti gli oggetti citati sono galassie lenticolari o spirali *early-type* (si veda il prosieguo per una classificazione più dettagliata) ed analizzando le abbondanze relative delle due componenti, le rispettive età e metallicità, la co-rotazione di una delle due componenti rispetto al disco di gas, infine l'eventuale palesarsi di processi di formazione stellare.

Tuttavia, prima di procedere con una simile analisi, è necessario descrivere il fenomeno della controrotazione andando ad esaminare i principali metodi d'indagine utilizzati per rivelare preliminari indizi della sua presenza (1.2); l'incidenza statistica del fenomeno in relazione ai differenti tipi morfologici o all'ambiente in cui si trovano le galassie in esame (1.3); infine alcune ipotesi di formazione dello scenario rilevato, soprattutto in base allo studio delle popolazioni stellari in controrotazione (1.4).

1.2 Metodi d'indagine

Se da un lato la controrotazione gassosa è facilmente rivelabile osservando l'opposta orientazione delle righe di emissione del gas ionizzato rispetto alle righe di assorbimento stellare in uno spettro ottico bidimensionale (come in Fig. 1.2), la controrotazione stellare richiede invece un'analisi più complessa, essendo le cinematiche delle differenti popolazioni stellari misurate a partire dalle medesime righe di assorbimento (solo nel caso in cui le due componenti siano fotometricamente simili, si rileva la tipica forma ad X delle righe, come in Fig. 1.3).

Tuttavia, un riferimento ad una LOSVD (Line-Of-Sight Velocity Distribution) bimodale può realisticamente rappresentare un effettivo indizio della presenza di due componenti controrotanti come si osserva in Fig. 1.4, sebbene tale bimodalità sia una caratteristica sempre meno evidente, ad esempio, al crescere dell'abbondanza relativa o della differenza di velocità relativa di una componente rispetto all'altra, dipendendo quindi in generale dalle proprietà della galassia oltre che, naturalmente, dal *setup* strumentale utilizzato per le osservazioni spettroscopiche (e.g., scelta dell'intervallo di frequenze d'osservazione, risoluzione dello spettrografo).

D'altra parte, stringenti evidenze di controrotazione possono altresì derivare dallo studio della cinematica della galassia, e in particolare dalla presenza di due picchi simmetrici spostati rispetto al centro e relativi alla dispersione di velocità delle stelle, congiuntamente ad una velocità di rotazione nulla

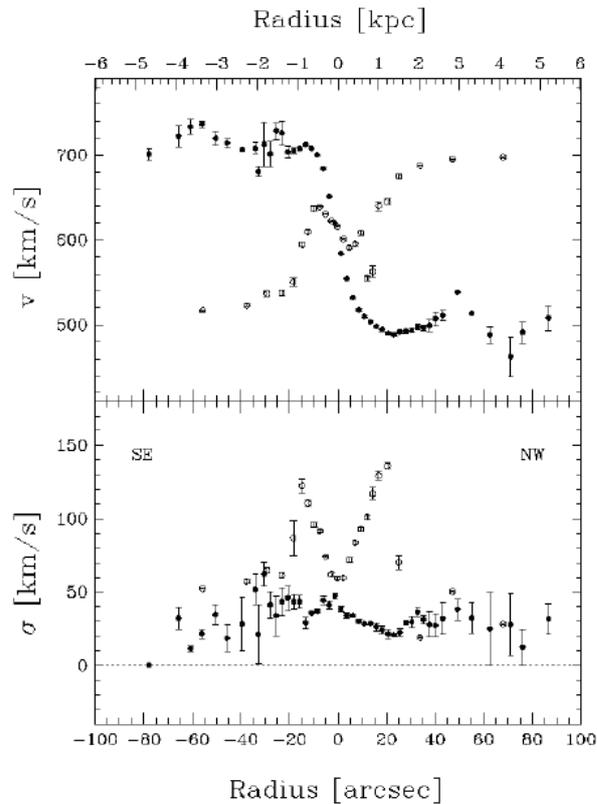


Figura 1.1: Cinematica di NGC 3593: profili radiali di velocità (in alto) e di dispersione di velocità (in basso) per la controrotazione; i cerchi vuoti rappresentano le stelle, i cerchi pieni il gas ionizzato. Tratto da Bertola et al. 1996.

misurata lungo l'asse maggiore della galassia; si tenga conto che tali caratteristiche sono meglio rilevate nell'intervallo radiale ove le due componenti hanno analoghe luminosità e LOSVD non risolte.

1.3 Statistica ambientale e morfologica

Trattando dell'ambiente in cui si rilevano galassie con evidenze di controrotazione, si può dire che esso non appare statisticamente differente da quello tipico delle galassie normali, anzi non vi è evidenza, ad esempio, di recenti interazioni con galassie satelliti o galassie di simile grandezza (Bettoni et al. 2001). Com'è naturale, tali argomenti pongono dei limiti sull'origine del fenomeno controrotatorio, richiedendo la morfologia attuale l'assenza di galassie vicine o l'impossibilità di vedere modifiche in atto della densità di oggetti nei dintorni, e si conclude pertanto che l'accrescimento del gas retrogrado non

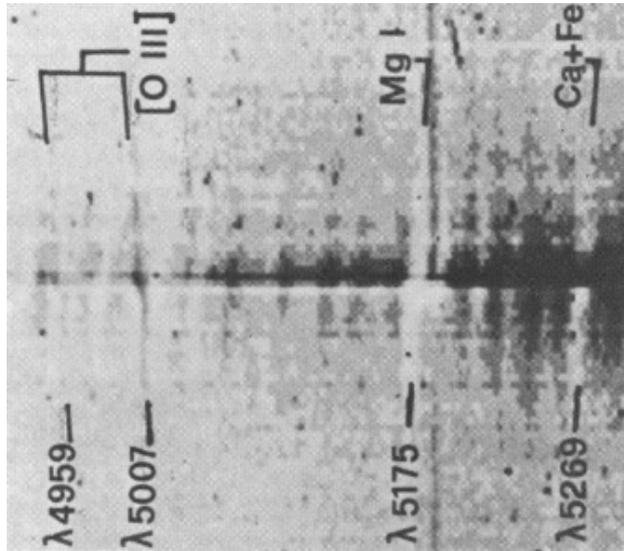


Figura 1.2: Opposta orientazione delle righe in emissione del gas ionizzato [OIII] e di quelle in assorbimento relative al corpo stellare in uno spettro ottico bidimensionale lungo l'asse maggiore della galassia NGC 4546, ospite di controrotazione gassosa. Tratto da Galletta 1987.

può che essere un processo non traumatico, essendo eventuali fenomeni di *merging* imputabili solamente a fasi iniziali della vita della galassia e difficilmente rilevabili in quanto indizi come detriti collisionali e code mareali sono solitamente strutture transienti (sopravvivono generalmente da qualche centinaia di *Myr* a qualche *Gyr*) e caratterizzate da basse brillanze superficiali ($25 \text{ mag arcsec}^{-2}$ nelle prime fasi, sino a più di $27 \text{ mag arcsec}^{-2}$ nelle fasi più avanzate).

D'altra parte è utile notare che non sono stati al momento rilevati fenomeni di controrotazione in galassie a spirale *late-type*, appartenendo la maggior parte delle galassie ospiti alla classe delle lenticolari o a quelle delle spirali *early-type* (se non a galassie ellittiche); interessante a questo proposito è l'analisi di D'Onghia et al. 2013, ove la soppressione dei bracci di spirale in galassie a spirale con evidenze di controrotazione è consistente con quanto determinato da simulazioni ad alta risoluzione ad N corpi.

Ad ogni modo, la casistica non è ancora tanto ampia da permettere soddisfacenti conclusioni riguardo all'incidenza statistica del fenomeno: la presente tesi si prefigge pertanto come scopo quello di aggiungere un caso di controrotazione alla rosa di quelli già analizzati, proponendo un confronto con essi ed ampliandone la statistica.

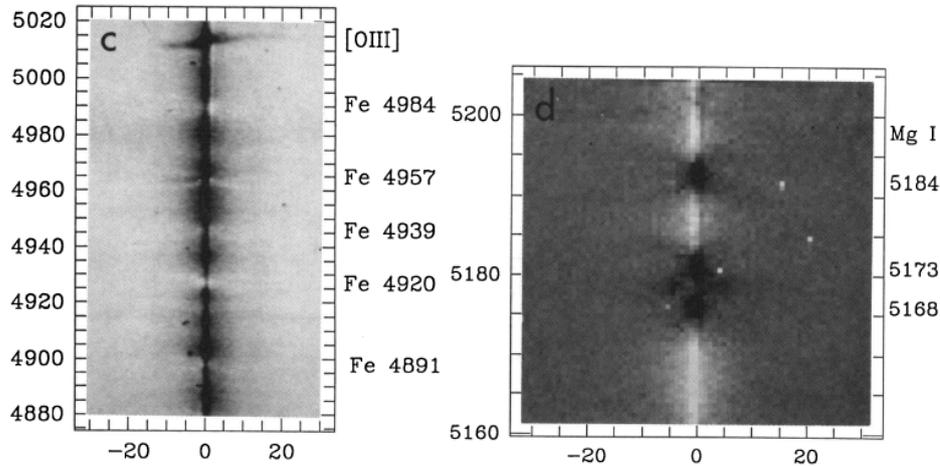


Figura 1.3: Spettro lungo l'asse maggiore di NGC 4550, ospite di controrotazione stellare. A sinistra la regione dell'[OIII] e del Fe, a destra quella del tripletto del Mg: in entrambi i casi si notano le tipiche forme ad X delle righe. Tratto da Rubin et al. 1992.

1.4 Scenari di formazione

In generale è chiaro (e consistente con simulazioni numeriche) che l'accrescimento episodico o prolungato di gas dall'ambiente (Thakar et al. 1996 e Thakar et al. 1998) o da galassie satellite nane ricche di gas (Thakar et al. 1997) è in accordo con i meccanismi ipotizzati per dare ragione dell'acquisizione retrograda di gas esterno; d'altra parte la formazione di un disco controrotante è favorita in galassie S0 povere di gas in quanto, ad esempio, il gas esterno è respinto da quello pre-esistente in galassie a spirale e co-rotante col disco stellare (Bettoni et al. 2003). Una seconda possibilità è che la componente retrograda appena acquisita collida col gas pre-esistente e progrado: il sistema in questo caso perderebbe il proprio supporto centrifugo e andrebbe ad accrescersi verso il centro galattico, formando un nuovo disco solo nel caso in cui il prodotto della collisione abbia una massa maggiore del gas pre-esistente (Lovelace et al. 1996). D'altra parte, un disco stellare controrotante rappresenta l'eventuale risultato finale di attività di formazione stellare relativa ad un disco di gas controrotante, e questo spiegherebbe la maggiore incidenza di dischi gassosi controrotanti in galassie S0 piuttosto che in galassie a spirale (Pizzella et al. 2004).

Un'alternativa al processo di formazione di origine esterna può coinvolgere la dissoluzione interna di un'eventuale barra o di un alone stellare triassiale, dando luogo alla formazione di due dischi stellari identici e controrotanti per ragioni di distribuzione uniforme tra orbite orarie ed antiorarie (Evans et al.

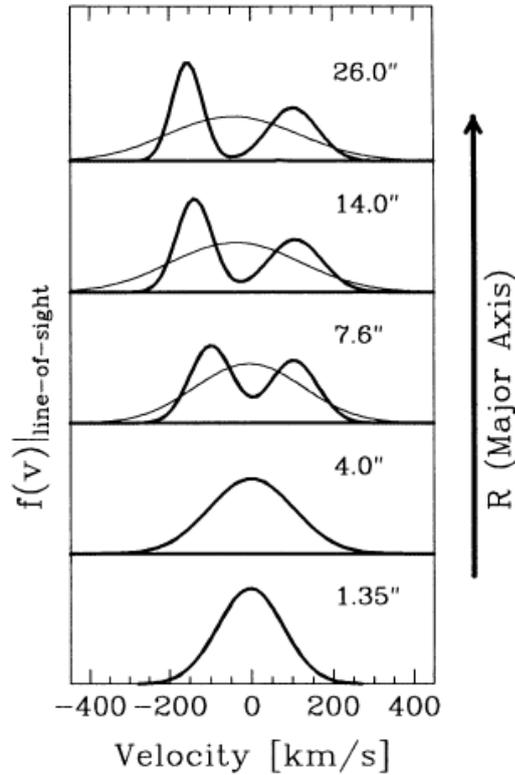


Figura 1.4: Bimodalità della LOSVD lungo l'asse maggiore di NGC 4550, galassia ospite di controrotazione stellare. Tratto da Rix et al. 1992.

1994).

Lo studio delle popolazioni stellari corrispondenti ai dischi controrotanti può dare indizi riguardo al processo di formazione, in particolare analizzando differenze in età e metallicità. Ad esempio, l'accrescimento in gas seguito da formazione stellare prevede sempre una minore età per la componente retrograda, così come differenti metallicità ed α -*enhancement*; diversamente, un processo di formazione dall'interno prevede uguali masse, composizioni chimiche ed età per le due componenti. Per uno studio di questo tipo è pertanto richiesta una decomposizione spettroscopica dei due dischi stellari che ne separi i contributi allo spettro osservato della galassia; tale è il metodo che è stato utilizzato per sviluppare il presente lavoro.

Capitolo 2

Analisi dei dati

2.1 NGC 1366

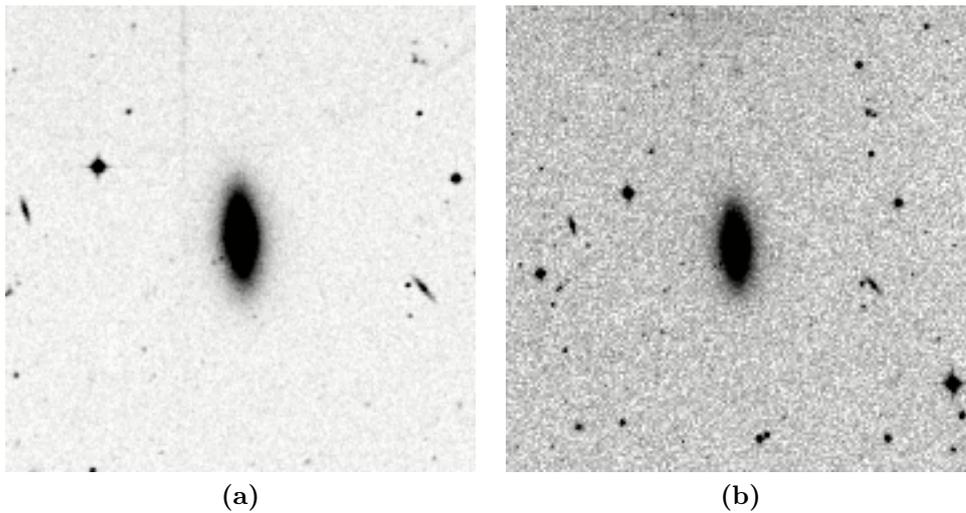


Figura 2.1: (a) Immagine di NGC 1366 presa su lastra IIIaJ da UKST presso AAO ($6.0 \times 6.0 \text{ arcmin}^2$); (b) Immagine di NGC 1366 presa in banda R dal telescopio Schmidt presso ESO a La Silla ($7.9 \times 7.9 \text{ arcmin}^2$).

Dopo aver dato conto dell'ampia varietà sotto la quale si presenta il fenomeno della controrotazione, si va, come già anticipato, ad analizzare la galassia NGC 1366 per determinare la cinematica e le caratteristiche generali dei due dischi stellari di cui si vuole verificare l'effettiva controrotazione.

NGC 1366 è una galassia lenticolare ordinaria (S0) secondo la classificazione di De Vaucouleurs (RC3), si mostra in cielo sostanzialmente *edge-on* e

si trova ad una distanza di 18.1 Mpc (il fattore di trasformazione da *arcsec* a *kpc* è pertanto $s = 0.088 \text{ kpc arcsec}^{-1}$). Ad essa corrispondono inoltre le coordinate equatoriali $(\alpha, \delta) = (03\text{h}33\text{m}53.4\text{s}, -31.19424^\circ)$ (J2000) e le vengono associati un redshift $z = 0.004$ ed una velocità rispetto al fondo cosmico $v_{3K} = 1123 \text{ km s}^{-1}$. I dati appena citati sono tratti dal NASA/IPAC Extragalactic Database.

Si è scelto di studiare questa galassia nell'ottica di ampliare il campione di galassie che ospitano fenomeni di controrotazione stellare e di ottenere risultati statisticamente via via più completi. D'altra parte, l'analisi è ugualmente interessante per lo studio e la verifica delle ipotesi poco sopra trattate riguardo allo scenario di formazione del fenomeno controrotatorio.

Inoltre, la si è scelta nell'ottica di approfondire e verificare quanto viene accennato in Morelli et al. 2008, ove si afferma che i peculiari gradienti di età e metallicità osservati per le popolazioni stellari del bulge di NGC 1366 suggeriscono l'ipotesi che la galassia ospiti una sottostruttura, appunto una componente cinematicamente disaccoppiata, che risulta più giovane rispetto al corpo stellare principale del bulge e formata da materiale che sarebbe stato acquisito per mezzo di interazione o *merging*.

2.2 Osservazione e riduzione dati

I dati utilizzati nel prosieguo derivano dalle osservazioni e dalla riduzione già eseguite dal Dott. Lorenzo Morelli nell'ambito di altre ricerche.

Le osservazioni spettroscopiche di NGC 1366 sono state effettuate il 26 agosto 2003 a partire dalle ore 06:23:27.664 UT con il telescopio NTT da 3.58 m di diametro situato a La Silla (Cile) presso ESO (European Southern Observatory).

Il telescopio disponeva dello spettrografo EMMI (ESO Multi-Mode Instrument), del quale è stato utilizzato il grating n. 6 ($1200 \text{ tratti mm}^{-1}$ e λ di balze pari a 5170 \AA) in combinazione con una slit da $1''.0 \times 330''.0$ ed un CCD da 2048×4096 pixel di $15 \times 15 \text{ }\mu\text{m}^2$; il gain era pari a $0.74 \text{ e count}^{-1}$. In particolare sono stati acquisiti, con un'airmass media durante l'osservazione pari a 1.35, due spettri dell'asse maggiore della galassia ($PA = 2^\circ$), ciascuno con un tempo di integrazione pari a 2700 s per un tempo totale (effettivo) di 1.5 h , nel range spettrale $4700 \div 5900 \text{ \AA}$ con una scala del telescopio pari a $0.332'' \text{ px}^{-1}$; si è pertanto tenuto conto di una $FWHM = 1.03 \text{ \AA}$, ossia $\sigma = 0.44 \text{ \AA}$, ossia $\sigma = 26 \text{ km s}^{-1}$.

Dopo la sottrazione del *bias*, i due spettri sono stati corretti per *flat-field*, sono stati eliminati eventuali raggi cosmici e la riduzione si è conclusa con

la calibrazione in lunghezza d'onda e in flusso mediante l'utilizzo di IRAF. Successivamente, prima di iniziare l'analisi dei dati ottenuti, è stato sottratto il contributo del cielo, determinato considerando le estremità della slit ove la luce stellare della galassia risultava trascurabile. Infine, è stato possibile ottenere un unico spettro dell'asse maggiore di NGC 1366, sommando i due diversi spettri col centro del continuo stellare utilizzato come riferimento.

2.3 Analisi e risultati

Per dare evidenza della controrotazione, lo spettro della galassia è stato inizialmente analizzato senza disaccoppiare le due componenti; in seguito a ciò, di fronte a palesi indizi di controrotazione, si sono ricavate le proprietà delle popolazioni stellari per entrambe le componenti a partire dalla già citata decomposizione spettroscopica. Parallelamente, si è pure tenuto conto del contributo del gas.

2.3.1 Fit a singola componente

Utilizzando codici IDL, lo spettro della galassia è stato mediato lungo la direzione spaziale, ottenendo un rapporto segnale-rumore $S/N \geq 45$. Per ogni raggio si è poi convoluta una combinazione lineare di popolazioni stellari singole (per i riferimenti si veda Maraston et al. 2011) con la distribuzione di velocità lungo la linea di vista (LOSVD) associata alle righe dello spettro ed assunta gaussiana a meno di deviazioni al terzo e quarto ordine descritte da polinomi di Gauss-Hermite (funzioni dei parametri h_3 e h_4); in questo modo la LOSVD dipende solo dalla velocità v e dalla dispersione di velocità σ della componente stellare e dai parametri h_3 e h_4 . Oltre alla componente stellare è stata considerata la componente di gas ionizzato. Il fit è stato poi eseguito col metodo statistico di minimizzazione del χ^2 .

I risultati delle misure sono mostrati in Tab. 4.2 ed illustrati in Fig. 2.3. In particolare la cinematica stellare si estende fino a $|r| \simeq 30''$ per entrambi i lati del nucleo e la curva di rotazione si mostra simmetrica rispetto al centro: la velocità, corretta rispetto alla velocità di sistema e deproiettata, raggiunge un massimo $v \simeq 30 \text{ km s}^{-1}$ per $|r| \simeq 2''$; poi decresce sino a $v \simeq -20 \text{ km s}^{-1}$ per $|r| \simeq 7''$; infine rimane intorno a valori prossimi allo zero sino ai raggi in cui le misure divengono meno attendibili. Diversamente, la curva della dispersione di velocità risulta lievemente decrescente a partire dal centro con un valore $\sigma(r = 0) \simeq 160 \text{ km s}^{-1}$ con un'ancor più lieve tendenza a crescere da $|r| \simeq 8''$.

È chiaro che il comportamento dei profili radiali di velocità e dispersione di velocità è un indice della presenza di una componente stellare controrotante, note invece le curve di rotazione solitamente ricavate da oggetti che non mostrano fenomeni controrotatori. Di norma, infatti, non si rilevano curve dove, oltre un certo raggio, la velocità risulti intorno a valori nulli. Tali valori nulli sono invece ben interpretabili come somme algebriche di due contributi analoghi in modulo ma opposti in segno, com'è appunto il caso di due componenti stellari controrotanti. Inoltre, questo ragionamento è confermato da un confronto immediato dello spettro della galassia con il fit proposto dalle convoluzioni ad una singola popolazione stellare: è subito evidente che il programma trascura coppie di righe in assorbimento che non sono rassimilabili a doppietti, bensì alla somma dei contributi delle componenti controrotanti. Esempi di ciò si vedono in corrispondenza delle righe del ferro o del doppietto del magnesio, ove il fit di convoluzione trascura la doppia riga non corrispondente ad eventuali doppietti; si veda a questo proposito Fig. 2.2

Diversamente, dall'analisi ad una componente si può subito concludere che il gas ionizzato, studiato a partire dalle righe in emissione dell' $H\beta$ e dal doppietto dell'[OIII], non co-ruota con alcuna fra le due componenti in controrotazione; anzi, si può affermare che il gas è in generale poco e la quasi assenza della riga in emissione dell' $H\beta$ è sintomo dell'assenza di formazione stellare (o di assai debole attività), come ci si può aspettare per una galassia lenticolare. Si rimanda a Tab. 4.1 per le misure.

2.3.2 Fit a doppia componente

Dal momento che l'analisi a due componenti richiede un maggiore rapporto S/N , si sono considerati otto intervalli radiali (quattro sul lato positivo e quattro sul lato negativo, indicativamente simmetrici rispetto al centro). I contributi ai diversi raggi appartenenti all'intervallo sono stati sommati e si è scelto come raggio rappresentativo il valor medio, lavorando complessivamente nell'intervallo $5'' \leq |r| \leq 30''$, ove la controrotazione, come si è visto dai fit a singola componente, raggiunge il suo massimo contributo.

Si fa subito notare che l'intervallo rappresentato dal valor medio $r \simeq -6''$ non verrà considerato nel prosieguo (grafici compresi) in quanto si è ivi riscontrato un rapporto S/N troppo basso rispetto agli altri intervalli.

Con un simile utilizzo di codici IDL rispetto a quanto fatto per il fit ad una componente, è stato eseguito un fit dello spettro della galassia a partire da due template sintetici (uno per ciascuna delle due componenti) ottenuti come combinazione lineare dei modelli già citati di Maraston et al. 2011, poi convoluti con due LOSVD gaussiane. D'altra parte, si teneva pure conto della presenza di gas ionizzato, le cui emissioni sono state analogamente

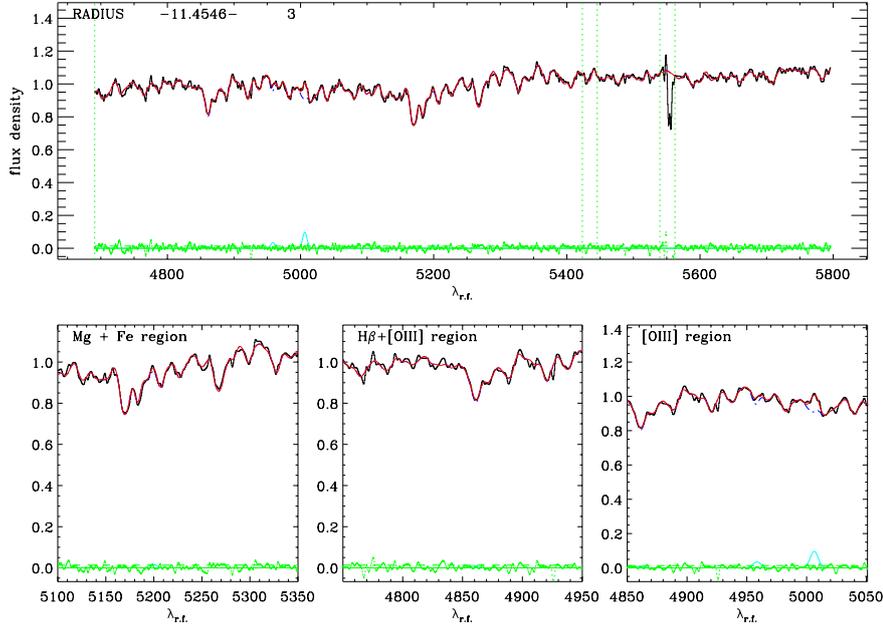


Figura 2.2: Fit ad una componente per lo spettro lungo l’asse maggiore di NGC 1366 a $r = -11''.45$. In nero lo spettro osservato, in rosso il fit, in ciano le emissioni del gas ionizzato, in verde i residui. Nella regione del doppietto del magnesio e delle righe del ferro, in particolare intorno a $\lambda = 5100 \div 5300 \text{ \AA}$, si possono notare incongruenze tra fit e spettro reale. Nei tre riquadri in basso vengono ingrandite le regioni di Mg e Fe e delle emissioni del gas.

descritte da funzioni gaussiane. Parametri liberi del modello erano quindi la velocità v e la dispersione di velocità σ delle stelle, l’intensità relativa delle due componenti stellari, infine v , σ e intensità del gas.

A questo punto, la decomposizione spettroscopica ha ricavato i due best-fit per i template degli spettri stellari sintetici ed il best-fit per le emissioni gassose, esplicitando congiuntamente i contributi relativi in luminosità delle due componenti e tenendo conto del fatto che lo spettro medio ricavato risultava dalla sovrapposizione dei due contributi; si veda a questo proposito Fig. 2.4 e Figg. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 in Appendice (4).

Disaccoppiate le componenti stellari, sono state ricavate le rispettive cinematiche (con velocità corrette per la velocità di sistema e successivamente deproiettate) e sono state messe a confronto con quella ricavata dal fit a sin-

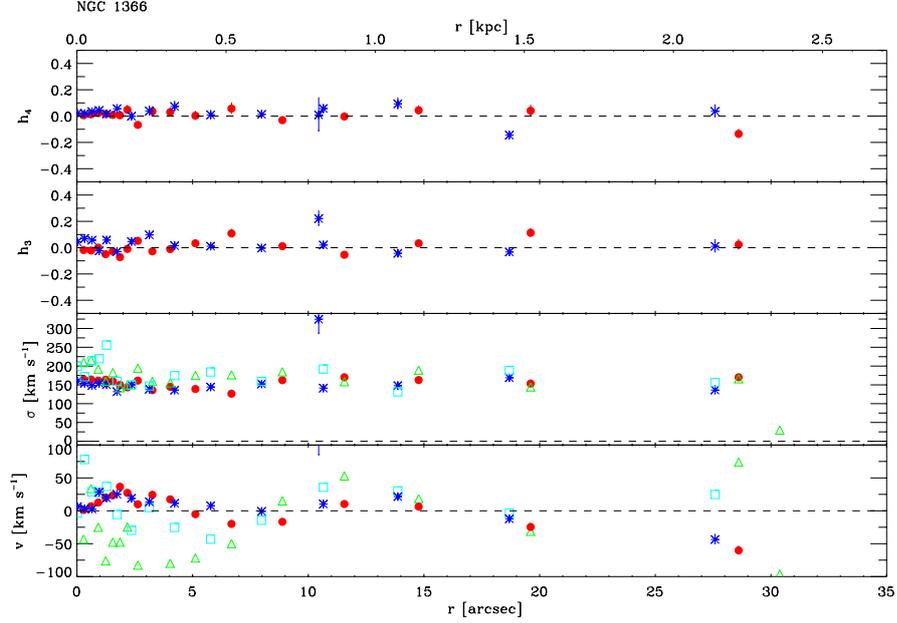


Figura 2.3: Cinematica stellare dedotta dal fit ad una componente stellare sullo spettro per l’asse maggiore di NGC 1366; la parte dei raggi negativi è stata ripiegata sul lato positivo, ove cerchi rossi e stelle blu rappresentano le stelle, rispettivamente per raggi negativi e positivi, mentre quadrati e triangoli vuoti rappresentano il gas, rispettivamente per i raggi negativi e positivi.

gola componente; Tab. 4.3 mostra i suddetti risultati (comprese le luminosità relative rispetto al totale) senza la correzione per la velocità di sistema, poi illustrati in Fig. 2.5.

Come già evidenziato nel paragrafo precedente, la curva di rotazione segue l’andamento di una galassia senza fenomeni di controrotazione sino a $|r| \simeq 2''$, raggio a partire dal quale la cinematica non è più interpretabile se non con l’introduzione di una componente controrotante: considerando i risultati del fit ad una componente, si vede infatti che la curva di rotazione correttamente cresce sino al raggio sopra indicato, ma va poi ad assestarsi su valori mediamente nulli, inspiegabili se non con l’introduzione di due dischi stellari in controrotazione. Lo stesso ragionamento è valido per la curva della dispersione di velocità sino a raggi poco maggiori, $|r| \simeq 6''$, ove la curva per il fit ad una componente, contrariamente a quanto ci si aspetta per galassie

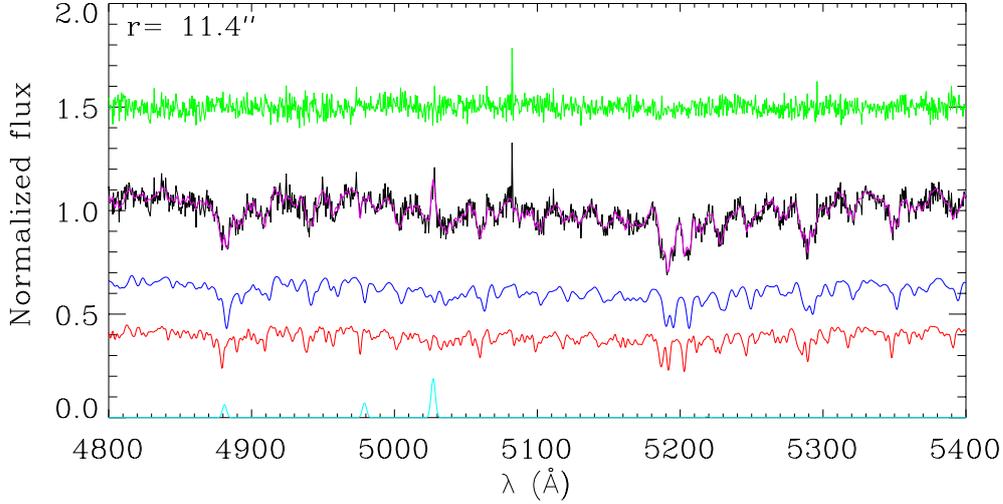


Figura 2.4: Esempio di best-fit a due componenti stellari ed una componente di gas ionizzato ad $r = 11''.4$. Dall'alto al basso: in verde i residui rispetto allo spettro originale, in nero lo spettro originale, in viola il fit, in blu la componente principale, in rosso la secondaria, in ciano le emissioni del gas ionizzato. In figura sono poi messe in evidenza le abbondanze relative delle due componenti.

ad una sola componente stellare, torna a crescere, risultando in effetti dalla somma delle dispersioni relative alle componenti controrotanti.

D'altra parte, si nota che la componente alla quale si associa circa il 65% della luminosità della galassia, mostra in modulo una velocità di rotazione minore rispetto alla componente controrotante; correttamente, poi, la dispersione di velocità associata al corpo stellare principale risulta maggiore rispetto al corpo retrogrado: da argomenti di dinamica è infatti noto che, dato un medesimo potenziale al quale sono soggette le due componenti, una minore velocità di rotazione, ossia una maggiore differenza rispetto alla velocità circolare, equivale ad una maggiore dispersione.

Infine, ricavati i due template sintetici di best-fit, sono stati estratti grazie ad essi gli indici di Lick $H\beta$, Mgb , $Fe5270$ e $Fe5335$ come definiti in Worthey et al. 1994. È bene notare che questo passaggio è valido se si assume che i template siano una buona approssimazione delle popolazioni stellari medie delle due componenti controrotanti, e ciò dipende dalla libreria di spettri stellari che si è adottata e dall'accuratezza del programma di fit nel ricavare simultaneamente le proprietà cinematiche (velocità e dispersione di velocità) e le proprietà caratteristiche delle due popolazioni (continuo e profondità delle righe).

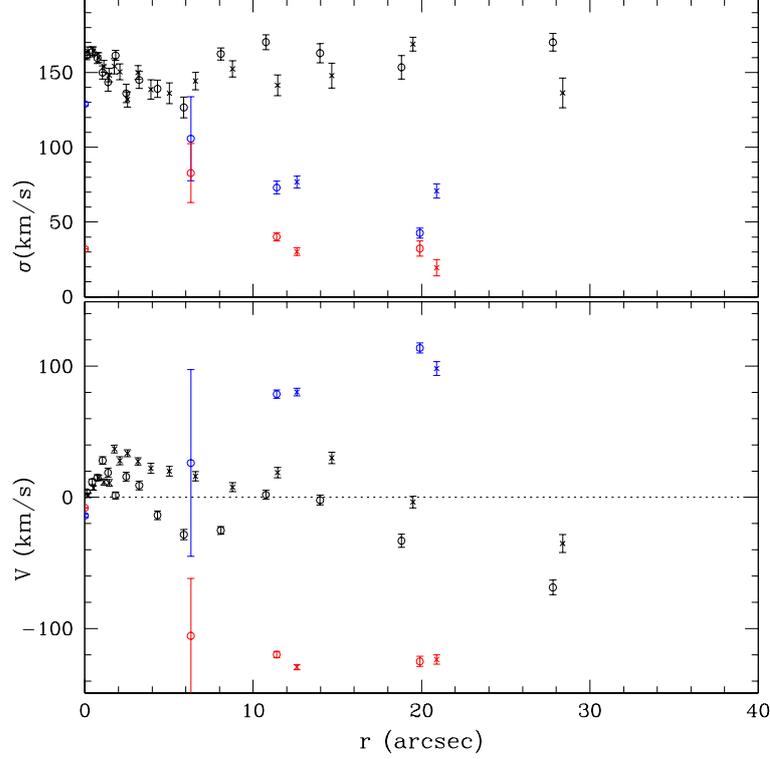


Figura 2.5: Cinematica stellare dedotta dal fit a due componenti stellari sullo spettro per l'asse maggiore di NGC 1366; la parte dei raggi negativi è stata ripiegata sul lato positivo, ove i simboli blu si riferiscono alla componente principale mentre i simboli rossi a quella controrotante, in analogia alla convenzione adottata nella decomposizione spettroscopica; in nero vengono riproposti i dati relativi al fit ad una sola componente stellare.

Con questi risultati si sono quindi calcolati l'indice medio del ferro $\langle Fe \rangle = (Fe5270 + Fe5335)/2$ e l'indice combinato magnesio-ferro $[MgFe]' = [Mg b \cdot (0.82 \cdot Fe5270 + 0.28 \cdot Fe5335)]^{1/2}$, dove quest'ultimo indice è di fatto indipendente dall' α -enhancement $[\alpha/Fe]$ e risulta pertanto un buon tracciante per la metallicità. Tali indici sono riportati in Tab. 4.4 e Tab. 4.5 e mostrati nelle Figg. 2.6 e 2.7 assieme ai modelli di popolazione stellare singola ricavati da Thomas et al. 2010, sapendo che l'indice $H\beta$ risulta relativamente sensibile all'età della popolazione e gli indici di ferro e magnesio alla metallicità.

In particolare:

- da Fig. 2.6, ove sono rappresentati $[MgFe]'$ in ascissa e $H\beta$ in ordinata,

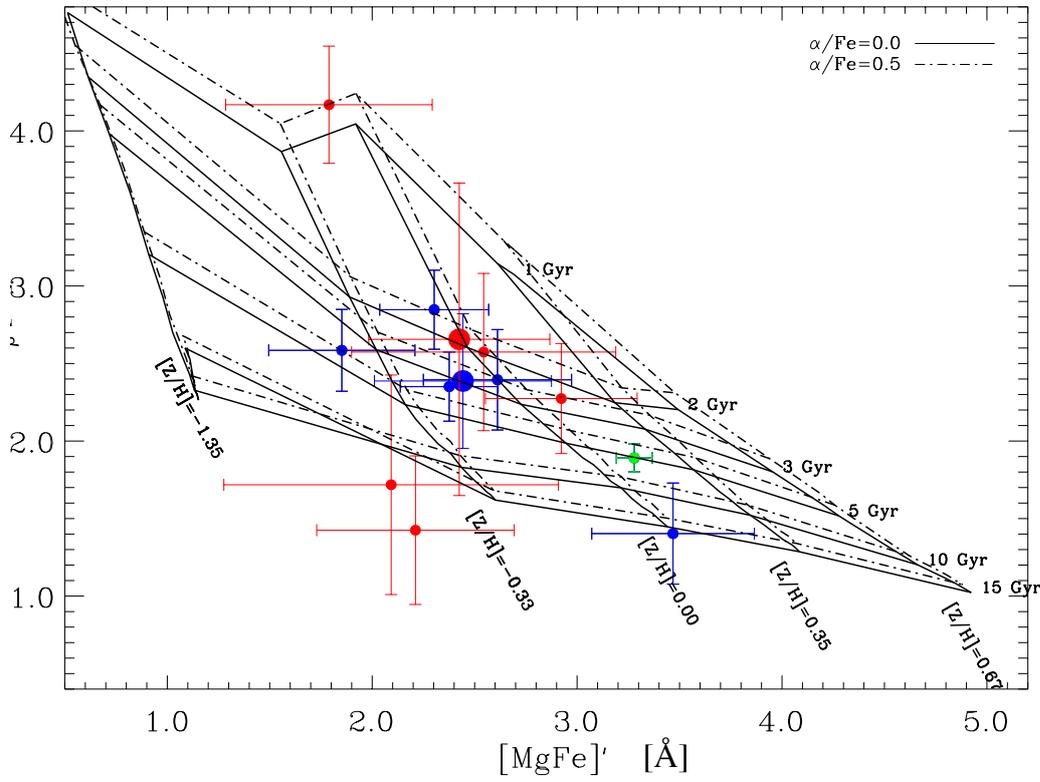


Figura 2.6: In grafico sono messi a confronto i valori degli indici $H\beta$, in ordinata, e $[MgFe]'$, in ascissa; per la simbologia si rimanda al testo.

si vede dai valori medi relativi alle due componenti (i puntini rossi e blu più grandi) che quella controrotante sembra avere un'età inferiore (2 *Gyr*) rispetto a quella principale (3 *Gyr*), sia che $[\alpha/Fe]$ sia solare che sovra-solare; tuttavia, le larghe barre d'errore non permettono di trarre conclusioni sulla differenza di età, che nel complesso non risulta essere significativa. Il nucleo (punto verde), come ci si aspetta, si attesta su valori di età chiaramente maggiori (5 *Gyr*).

- da Fig. 2.7, ove sono rappresentati $[Mgb]'$ e $[\langle Fe \rangle]'$, si vede dai valori medi (i simboli rimangono gli stessi) che la metallicità $[Z/H]$ risulta essere simile per le due popolazioni ($[Z/H] \simeq -0.30 dex$), se non per un indice $[\alpha/Fe]$ mediamente sub-solare per la componente principale e (sovra)-solare per quella controrotante. Il nucleo si attesta invece su metallicità (sovra)-solari.

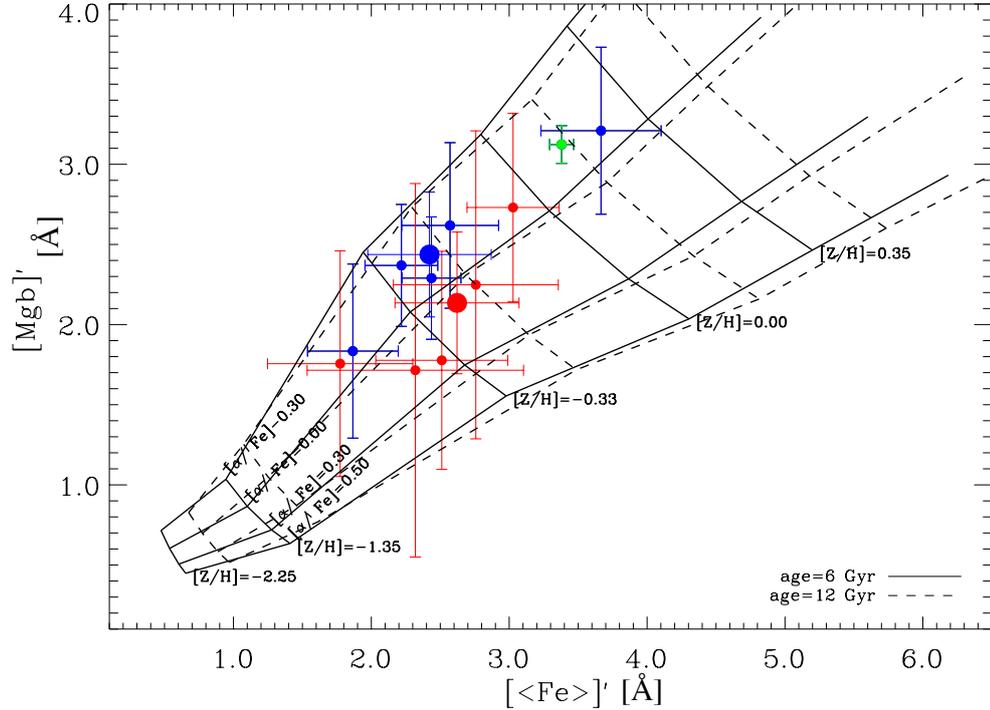


Figura 2.7: In grafico sono messi a confronto i valori degli indici $[Mgb]'$, in ordinata, e $\langle Fe \rangle$, in ascissa; per la simbologia si rimanda al testo.

2.4 Discussione dei risultati

Si può concludere che la galassia S0 ordinaria NGC 1366 ospita due dischi stellari controrotanti, nessuno dei quali risulta in particolare co-ruotare col poco gas ionizzato, parte del quale segue ora l'una ora l'altra componente.

Considerando il range radiale sino a $|r| \simeq 20''$, la decomposizione spettroscopica eseguita lungo l'asse maggiore della galassia per definire le proprietà delle due popolazioni stellari in controrotazione permette di affermare che la componente controrotante, contribuente al 35% alla luminosità totale, risulta di poco più giovane rispetto a quella principale (le età sono, ad ogni modo, differenti) e caratterizzata dalla medesima metallicità subsolare ma da un'abbondanza (sovra)-solare di elementi α . Si è pertanto verificato quanto ipotizzato in Morelli et al. 2008 (in particolar modo quanto anticipato riguardo alle caratteristiche del bulge).

D'altra parte, la differenza in età porterebbe ad un indizio di scenario di formazione esterno, legato a processi di acquisizione di materiale gassoso dall'ambiente circostante e/o a fenomeni di *merging*; tuttavia, le larghe barre

d'errore non permettono di presentare significative conclusioni rispetto al problema della formazione.

Nel capitolo successivo si andranno a confrontare questi risultati con quanto verificato per le galassie NGC 3593 (Bertola et al. 1996, Coccato et al. 2012), NGC 4138 (Pizzella et al. 2014), NGC 4191 (Coccato et al. 2015), NGC 4550 (Johnston et al. 2013, Coccato et al. 2012) ed NGC 5719 (Coccato et al. 2011), nella speranza di trarre conclusioni più significative riguardo alla controrotazione stellare nel contesto di una più ampia statistica a disposizione.

Capitolo 3

Discussione e conclusioni

Si presentano in questo capitolo sintetiche analisi rispetto ad altre cinque galassie con evidenze di controrotazione stellare. Con tali analisi si tenta di trarre qualche conclusione più generale riguardo al fenomeno, comunque con la consapevolezza dell'esiguità del campione, che rappresenta ad oggi la maggiore difficoltà nell'approcciare il fenomeno della controrotazione in ambito galattico.

3.1 NGC 3593

NGC 3593 viene classificata in RC3 come una galassia SA(s)0/a e si trova ad una distanza $d = 8.2 \text{ Mpc}$ (NASA/IPAC Extragalactic Database).

L'analisi (Cocato et al. 2012) è stata condotta mediante spettroscopia integral-field, decomponendo poi lo spettro nei contributi dei due dischi stellari in controrotazione e in quello del gas ionizzato. In particolare si è trovato che la componente controrotante, co-rotante rispetto al gas ionizzato e contribuente al 20% della luminosità totale, risulta più giovane, meno ricca di metalli e con un più alto indice di α -*enhancement* rispetto al disco stellare principale; si veda a questo proposito Fig. 3.1. Si fa inoltre notare la presenza di un anello legato ad una forte emissione di $H\beta$ e pertanto ad un'attività di formazione stellare.

Tali proprietà escludono lo scenario di formazione interno, preferendo invece un'origine esterna da acquisizione di gas e quindi una formazione stellare dall'esterno all'interno (gradiente radiale in età positivo); lo scenario di formazione di *merging* non può invece essere escluso con i dati a disposizione. Per un'ulteriore analisi, più vecchia, si rimanda a Fig. 1.1.

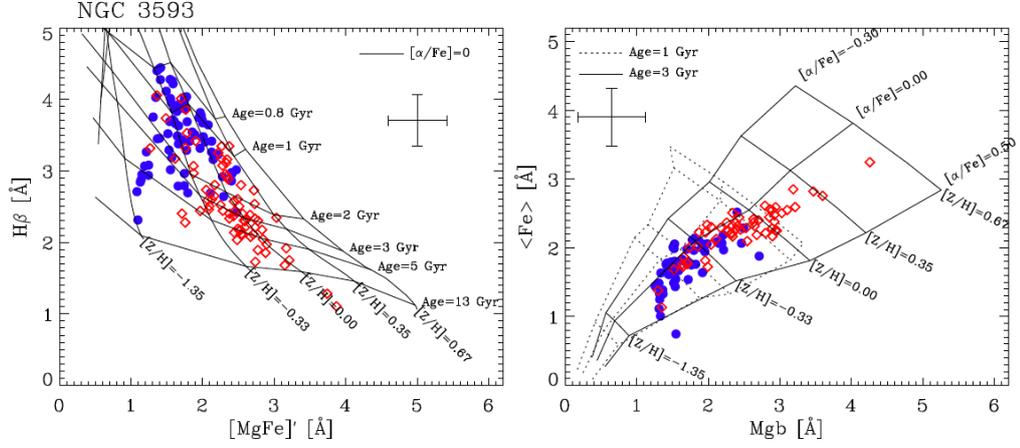


Figura 3.1: Larghezza equivalente degli indici di Lick: i rombi rossi rappresentano la componente principale, i cerchi blu quella secondaria controrotante; in sovrapposizione vi sono le predizioni per popolazioni stellari singole di Thomas et al. 2010. Tratto da Coccato et al. 2012.

3.2 NGC 4138

NGC 4138 viene classificata in RC3 come una galassia SA(r)0+ e si trova ad una distanza $d = 20.7 \text{ Mpc}$ (NASA/IPAC Extragalactic Database).

L'analisi (Pizzella et al. 2014) è stata condotta mediante spettroscopia long-slit lungo l'asse maggiore, decomponendo poi lo spettro nei contributi dei due dischi stellari in controrotazione e in quello del gas ionizzato. Si è trovato che nel range radiale sino a $|r| = 21''$ la componente principale, che contribuisce al 50% della luminosità totale della galassia, risulta più vecchia, più ricca di metalli e caratterizzata da un minore α -enhancement; si veda a questo proposito Fig. 3.2.

La diversa età delle due componenti elimina la possibilità che la formazione sia stata dovuta a meccanismi interni e supporta, piuttosto, l'ipotesi di un processo che avrebbe coinvolto l'acquisizione di materiale dall'ambiente e da eventi di *merging*. A conferma di ciò, alcune simulazioni numeriche (Thakar et al. 1997) hanno consistentemente descritto il processo di formazione di NGC 4138 basato sull'accrescimento retrogrado e continuo in gas, confrontandolo con un fenomeno di *merging* che avrebbe coinvolto una galassia nana ricca di gas e che richiederebbe un tempo-scala minore rispetto a quello legato a fenomeni di accrescimento continuo. In particolare, pertanto, alla componente controrotante si assocerebbe un anello in fase di produzione stellare.

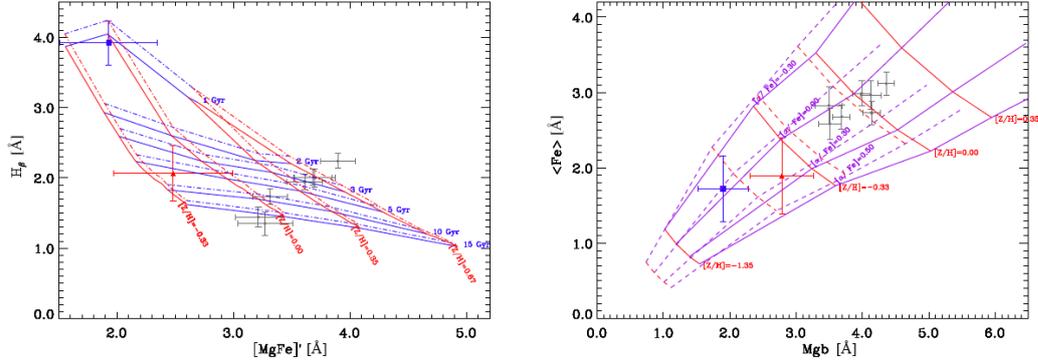


Figura 3.2: Larghezza equivalente degli indici di Lick: i triangoli rossi rappresentano la componente principale a $|r| \simeq 21''$, i quadrati blu quella secondaria contro-rotante, sempre a $|r| \simeq 21''$; i simboli grigi rappresentano i valori per $|r| \leq 12''$, ove le componenti non sono separabili; in sovrapposizione vi sono infine le previsioni per popolazioni stellari singole di Thomas et al. 2010. Nel pannello a sinistra i valori sono posti in grafico con due diversi valori di α -enhancement: 0.0 dex (linea continua) e 0.5 dex (linea tratteggiata); nel pannello a destra i valori sono posti in grafico con due differenti età: 2 Gyr (linea continua) e 12 Gyr (linea tratteggiata). Tratto da Pizzella et al. 2014.

3.3 NGC 4191

NGC 4191 viene classificata in RC3 come una galassia S0 e si trova ad una distanza $d = 45.1$ Mpc (NASA/IPAC Extragalactic Database).

L'analisi (Coccatto et al. 2015) è stata condotta mediante spettroscopia integral-field per un campo totale di $105'' \times 55''$, decomponendo poi lo spettro nei contributi dei due dischi stellari in controrotazione e in quello del gas ionizzato. Inoltre, è stata parimenti condotta una decomposizione fotometrica che ha pure evidenziato la presenza, oltre ad un bulge descritto dalla legge parametrica di Sérsic, di due dischi esponenziali, corrispondenti alle due componenti cinematiche controrotanti. In particolare, quella principale, al quale è associato il 64% della luminosità totale, ruota più lentamente (ed ha maggiore dispersione, il che è consistente coll'assegnarle le stelle di bulge) rispetto a quella controrotante, co-rotante invece rispetto al disco di gas ionizzato; si veda a questo proposito Fig. 3.2.

Dal punto di vista della composizione chimica dei due dischi stellari e del relativo scenario di formazione si può invece notare quanto segue. Il gradiente radiale in età della seconda componente è negativo e questo è indicativo di un processo di formazione dall'interno all'esterno per il disco secondario, legato ad uno scenario di accrescimento in gas o *merging*; d'altra parte, non

sembrano esserci differenze in metallicità ed α -*enhancement* tra le due componenti, il che suggerisce che il gas in accrescimento ha un'origine comune per i due dischi. Questa situazione si può interpretare alla luce delle simulazioni cosmologiche di Algorry et al. 2014: la componente principale della galassia si sarebbe formata dall'accrescimento in gas da due filamenti con caratteristiche chimiche assai simili; col passare del tempo ciascun filamento avrebbe ritorto l'altro nella direzione opposta, dando così luogo ad un doppio accrescimento con spin opposto.

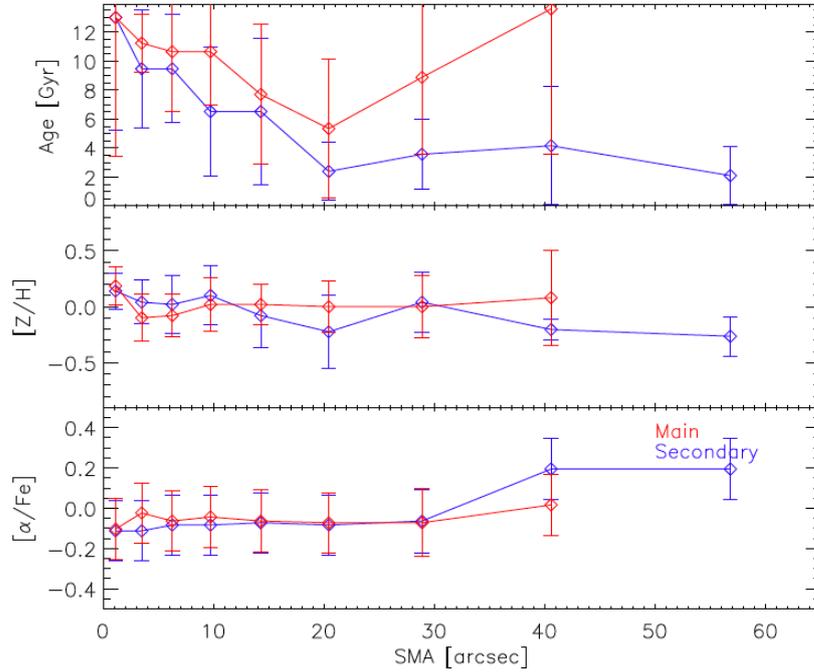


Figura 3.3: Proprietà delle popolazioni stellari in controrotazione in NGC 4191; l'analisi è relativa all'asse maggiore. Tratto da Coccato et al. 2015.

3.4 NGC 4550

NGC 4550 viene classificata in RC3 come una galassia SB0 e si trova ad una distanza $d = 16.8 Mpc$ (NASA/IPAC Extragalactic Database).

L'analisi (Coccato et al. 2012) è stata condotta mediante spettroscopia integral-field, decomponendo poi lo spettro nei contributi dei due dischi stellari in controrotazione e in quello del gas ionizzato. In particolare si è trovato che la componente controrotante, co-rotante rispetto al gas ionizzato, risulta più giovane, meno ricca di metalli e con un più alto indice di α -*enhancement*

rispetto al disco stellare principale, con delle differenze più marcate rispetto al caso di NGC 3593. Per tali proprietà valgono conclusioni analoghe a quelle ricavate per il caso di NGC 3593.

Similmente, nell'analisi di Johnston et al. 2013 si mette in luce l'impossibilità dello scenario di formazione dall'interno come proposto in Evans et al. 1994, viste le evidenti differenze in età tra le due componenti in controrotazione e spiegando tale errore sulla base di uno sfortunato annullamento tra le intense righe in assorbimento della popolazione stellare più giovane e le righe di emissione del gas ionizzato che co-ruota rispetto ad essa. Tuttavia, si aggiunge che non tutto deve essere cancellato del modello di Evans: infatti, lo scenario fu probabilmente tale, dando luogo a due dischi stellari identici, ma il successivo accrescimento creò un disco di gas rotante nella stessa direzione di uno dei dischi stellari e formante, poi, nuove generazioni di stelle e quindi una popolazione stellare composta nel disco co-rotante (si spiegherebbe così la minore età rispetto al corpo stellare principale, come si osserva). Si veda a questo proposito Fig. 3.4.

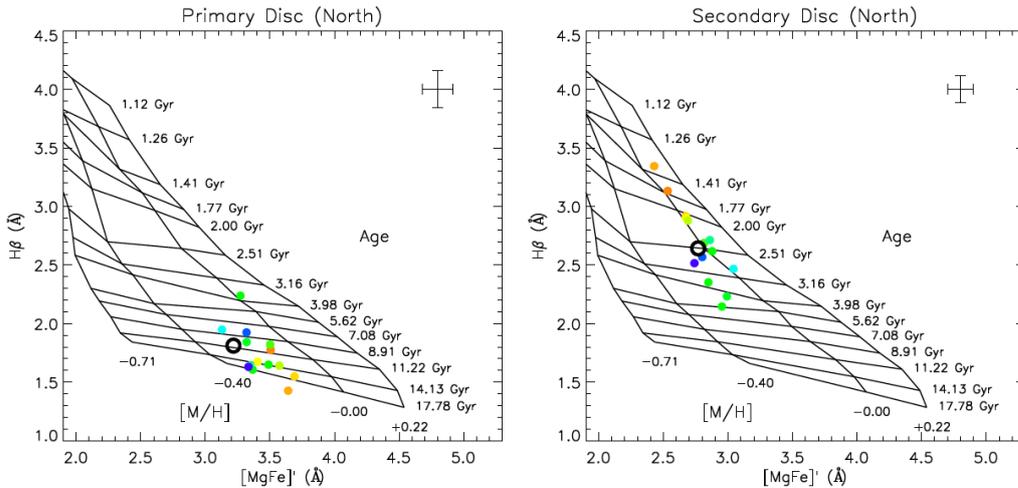


Figura 3.4: Proprietà delle popolazioni stellari in controrotazione: a sinistra si mostrano le larghezze equivalenti degli indici di Lick per la componente principale; a destra quelle relative alla componente secondaria controrotante. Più il colore dei punti si sposta verso il rosso più esso è rappresentativo di valori radiali vicini al centro; il cerchio nero vuoto rappresenta il valor medio per le regioni esterne della galassia; infine, una barra d'errore esemplificativa è mostrata in alto a destra. Tratto da Johnston et al. 2013.

3.5 NGC 5719

NGC 5719 viene classificata in RC3 come una galassia SAB(s)ab *pec* e si trova ad una distanza $d = 26.0 \text{ Mpc}$ (NASA/IPAC Extragalactic Database).

L'analisi (Coccatto et al. 2011) è stata condotta mediante spettroscopia integral-field per un campo totale di $28'' \times 28''$, decomponendo poi lo spettro nei contributi dei due dischi stellari in controrotazione e in quello del gas ionizzato. In particolare, la rotazione della componente stellare principale, che contribuisce al 56% della luminosità totale, è stata osservata sino a $40''$ dal centro e si misura un valore massimo della velocità pari a 150 km s^{-1} attorno a $10''$ dal centro; la componente controrotante co-ruota rispetto al gas ionizzato, raggiungendo 200 km s^{-1} attorno a $10''$ dal centro; si fa inoltre notare che le due componenti sono risolvibili sino a $2''$. D'altra parte, il gas si osserva in tutto il campo analizzato ed è caratterizzato da forti righe di emissione di $H\beta$.

Per quanto riguarda invece la composizione chimica delle due componenti stellari, si ricava dall'analisi degli indici di Lick che il corpo principale ha, mediamente, minori valori di $H\beta$ e maggiori valori di $[MgFe]'$, Mgb e $\langle Fe \rangle$ rispetto a quello controrotante. Questo si traduce in differenti proprietà per le rispettive popolazioni stellari: la componente principale mostra età tra 2 e 13.5 Gyr , metallicità circa solare ed α -*enhancement* sovra-solare, mentre quella controrotante risulta più giovane (da 0.7 a 2 Gyr), con un gradiente di metallicità negativo verso l'esterno (ove le età più giovani e le metallicità più alte ricorrono nelle regioni di intense emissioni $H\beta$) ed un α -*enhancement* sovra-solare. Da queste evidenze si può chiaramente concludere che l'età del disco controrotante è più giovane di quello principale e, in particolare, si sarebbe formato dall'accrescimento in gas (in corso) legato al fenomeno di *merging* rispetto alla galassia compagna NGC 5713: esse sarebbero connesse da un ponte mareale di idrogeno neutro che costituirebbe la riserva di gas che darebbe poi origine al disco stellare controrotante. Si vedano le Figg. 3.5, 3.6, 3.7.

3.6 Conclusioni

Nell'ambito dei sei oggetti analizzati, si può affermare che il fenomeno di controrotazione stellare si manifesta in modo analogo per tutto il campione, fatto salvo l'eventuale scenario di formazione che si associa a ciascuna galassia.

Notando che il tipo morfologico contempla galassie lenticolari o spirali *early-type*, si è infatti trovato che, al solito, la componente stellare princi-

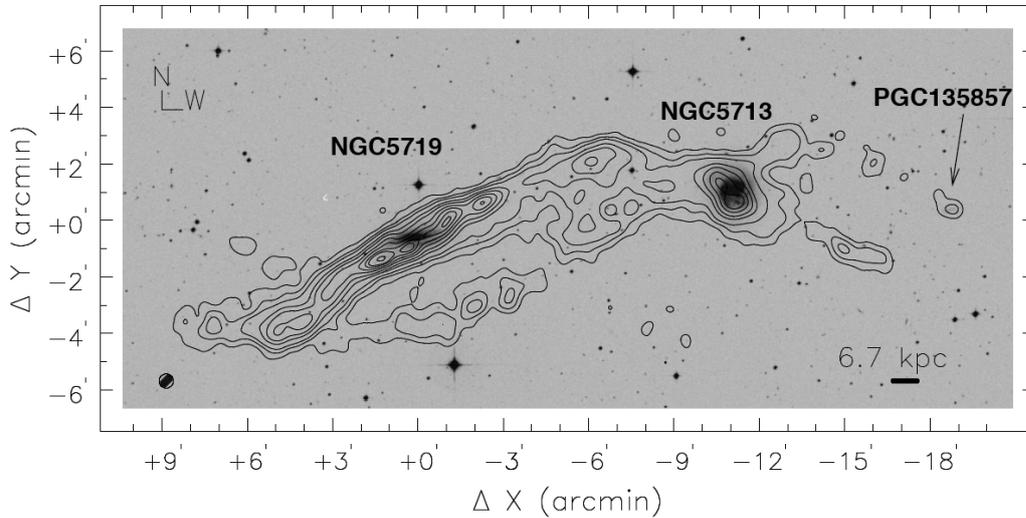


Figura 3.5: Mappa di distribuzione dell'idrogeno neutro nella regione d'interazione tra NGC 5719 ed NGC 5713 sovrapposta ad un'immagine in banda ottica della Digitized Sky Survey (DSS); il contorno con cui si identifica il valore più basso di HI rappresenta $7.0 \times 10^{19} \text{ atomi cm}^{-2}$, mentre l'incremento tra contorno e contorno vale $2.4 \times 10^{20} \text{ atomi cm}^{-2}$. Tratto da Vergani et al. 2007.

pale, contribuyente di norma a più della metà della luminosità totale della galassia, risulta più vecchia, più ricca di metalli e con un simile indice di α -*enhancement* rispetto alla componente controrotante, co-rotante invece nei confronti del disco di gas ionizzato. Nel caso particolare di NGC 1366 le caratteristiche citate sono tutte rispettate fuorché per la metallicità, sub-solare e molto simile per le due componenti, l' α -*enhancement*, maggiore per la componente principale, ed il disaccoppiamento di entrambe le componenti rispetto alla rotazione del gas ionizzato.

La differenza in età, d'altra parte, può giustificare uno scenario di formazione da accrescimento in gas o *merging*; in particolare, evidenze di un gradiente radiale in età per la componente controrotante positivo preferiscono un processo di formazione stellare *out-inside* e pertanto una probabile origine esterna (come nel caso di NGC 1366), mentre un valore negativo giustificerebbe un processo *inside-out*, legato piuttosto ad uno scenario di formazione interno.

Infine, un ultimo carattere eventualmente presente e di notevole importanza consiste, solitamente, in un anello associato ad un'intensa attività di formazione stellare; nel caso in cui esso sia rintracciabile, si nota una più marcata differenza in età tra le componenti stellari in controrotazione. Questo, come già si è messo in evidenza, non è il caso di NGC 1366, ove le righe

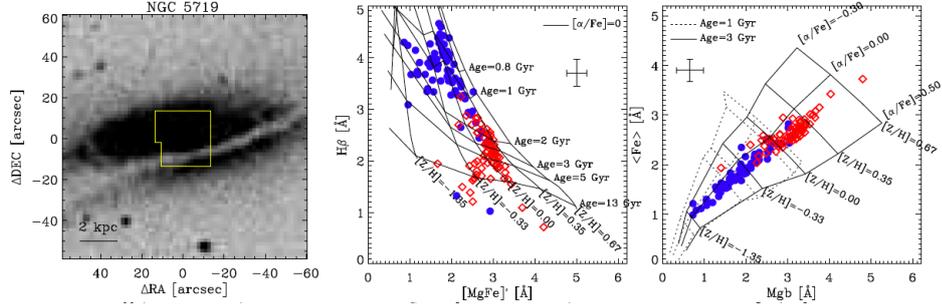


Figura 3.6: Si mostrano: nel pannello a sinistra il campo di vista osservato in spettroscopia integral-field; nel pannello centrale le larghezze equivalenti per gli indici $H\beta$ e Mgb ; nel pannello a destra le larghezze equivalenti per gli indici $\langle Fe \rangle$ e $[MgFe]$ con predizioni per età, metallicità ed α -enhancement sulla base di modelli a popolazione stellare singola. La componente principale è rappresentata dai rombi rossi, quella secondaria e controrotante dai cerchi blu. Tratto da Coccato et al. 2011.

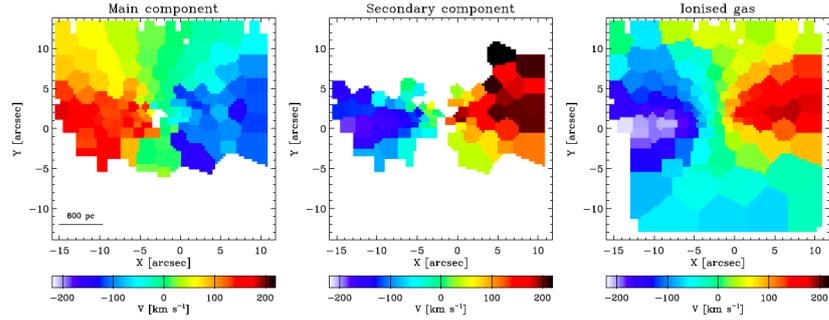


Figura 3.7: Campi di velocità bidimensionali della componente stellare principale (a sinistra), di quella secondaria controrotante (al centro) e del gas ionizzato (a destra). Tratto da Coccato et al. 2011.

in emissione del gas tracciante di formazione stellare sono molto deboli in corrispondenza a tutti i raggi analizzati.

Tutto questo, comunque, conduce a ribadire un fondamentale concetto a tutt'oggi innegabile: nonostante siano state scoperte ormai trent'anni fa, le galassie con evidenze di controrotazione rappresentano ancora un aperto tema d'indagine. Sebbene infatti i caratteri generali della formazione siano piuttosto chiari, molti sono tuttavia i dettagli mancanti, e tra i motivi non ultimo è l'aver a che fare con un campione statistico chiaramente limitato.

Capitolo 4

Appendice

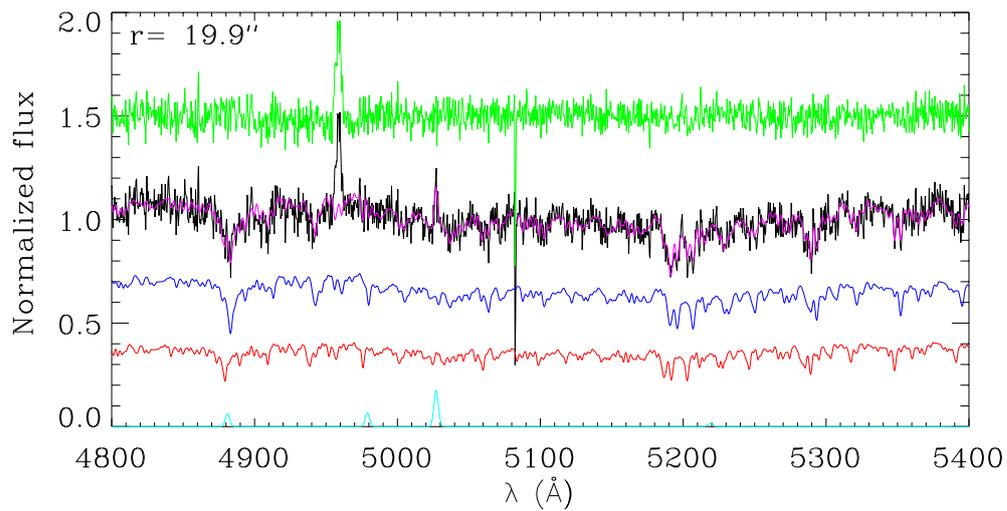


Figura 4.1: Best-fit a due componenti stellari ed una componente di gas ionizzato ad $r = 19''.9$. Dall'alto al basso: in verde i residui rispetto allo spettro originale, in nero lo spettro originale, in viola il fit, in blu la componente principale, in rosso la secondaria, in ciano le emissioni del gas ionizzato. In figura sono poi messe in evidenza le abbondanze relative delle due componenti.

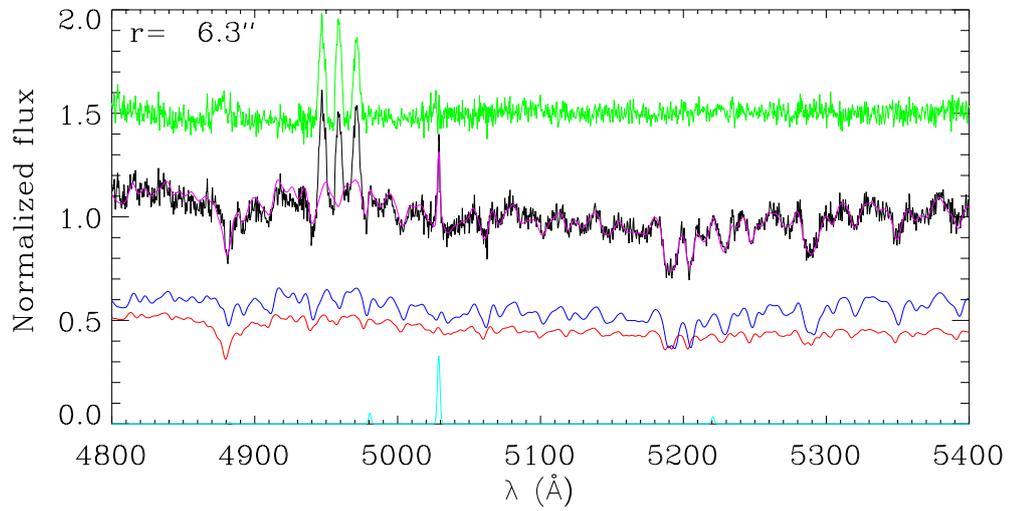


Figura 4.2: Best-fit a due componenti stellari ed una componente di gas ionizzato ad $r = 6''.3$. Per il resto della simbologia si rimanda alla figura precedente.

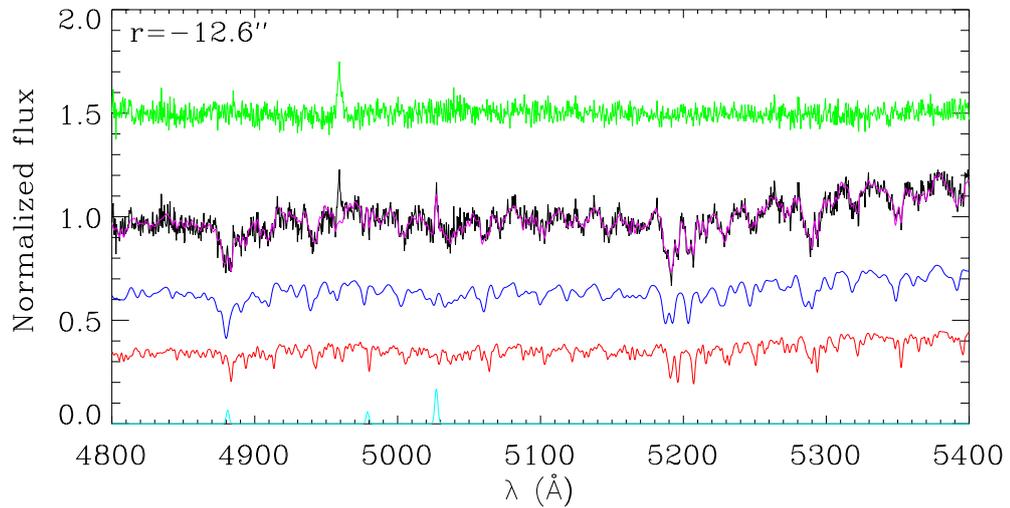


Figura 4.3: Best-fit a due componenti stellari ed una componente di gas ionizzato ad $r = -12''.6$. Per il resto della simbologia si rimanda alla figura precedente.

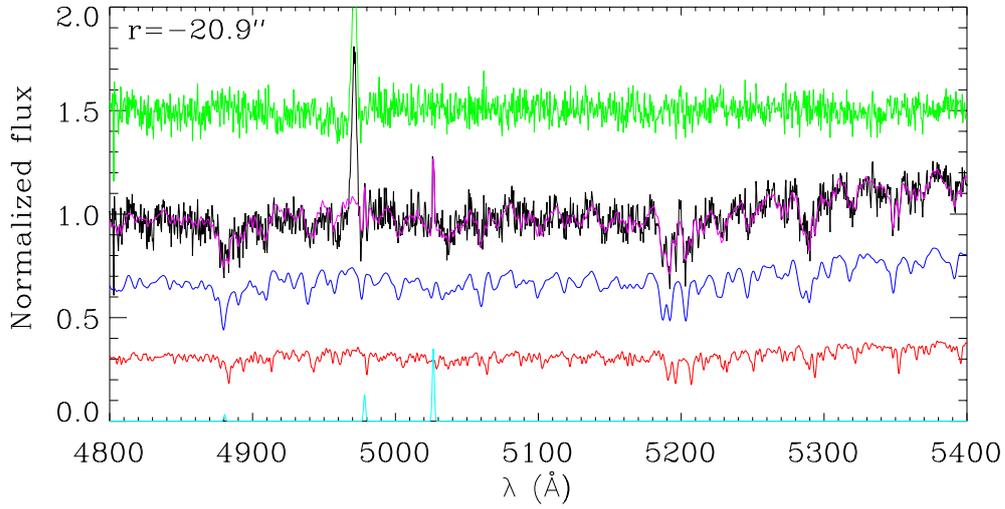


Figura 4.4: Best-fit a due componenti stellari ed una componente di gas ionizzato ad $r = -20''.9$. Per il resto della simbologia si rimanda alla figura precedente.

Tabella 4.1: Cinematica del gas per NGC 1366.

r [arcsec]	v_g [km s ⁻¹]	σ_g [km s ⁻¹]
-29.2	1187.3 ± 0.0	0.0 ± 0.0
-20.9	1180.6 ± 5.6	41.1 ± 5.6
-12.6	1212.9 ± 6.9	63.2 ± 6.8
-6.0	1169.6 ± 2.9	79.0 ± 2.9
0.0	1214.1 ± 7.9	124.6 ± 8.2
6.3	1312.1 ± 6.7	53.8 ± 6.7
11.4	1217.6 ± 6.7	89.1 ± 6.7
19.9	1216.7 ± 14.2	92.6 ± 14.3
28.2	1206.9 ± 13.5	89.0 ± 13.6

Tabella 4.2: Cinematica stellare dal fit ad una componente per NGC 1366.

r [arcsec]	v [km s ⁻¹]	σ [km s ⁻¹]	h_3	h_4
-28.38	1460.2 ± 6.9	136.3 ± 9.9	-0.010 ± 0.044	0.036 ± 0.044
-19.49	1428.6 ± 4.4	168.9 ± 4.6	0.033 ± 0.027	-0.145 ± 0.024
-14.67	1395.0 ± 4.3	147.9 ± 8.3	0.043 ± 0.025	0.093 ± 0.039
-11.45	1406.2 ± 3.9	141.4 ± 7.0	-0.020 ± 0.024	0.057 ± 0.033
-8.78	1417.3 ± 3.4	152.4 ± 5.4	0.003 ± 0.021	0.013 ± 0.025
-6.58	1408.9 ± 3.5	144.3 ± 5.8	-0.011 ± 0.022	0.009 ± 0.028
-5.02	1405.1 ± 3.6	136.1 ± 6.9	-0.015 ± 0.023	0.073 ± 0.034
-3.93	1402.9 ± 3.8	138.6 ± 6.5	-0.097 ± 0.023	0.038 ± 0.032
-3.16	1397.6 ± 2.8	150.0 ± 4.6	-0.046 ± 0.017	-0.001 ± 0.022
-2.53	1391.4 ± 2.7	132.0 ± 5.1	0.030 ± 0.017	0.056 ± 0.026
-2.08	1397.1 ± 3.1	150.4 ± 5.3	-0.058 ± 0.019	0.017 ± 0.025
-1.76	1388.1 ± 2.9	154.1 ± 5.1	0.024 ± 0.017	0.043 ± 0.023
-1.45	1414.0 ± 2.5	148.2 ± 4.5	-0.057 ± 0.015	0.034 ± 0.021
-1.13	1413.2 ± 2.4	154.1 ± 3.9	-0.069 ± 0.014	0.019 ± 0.018
-0.82	1410.1 ± 2.0	159.9 ± 3.3	-0.044 ± 0.012	0.020 ± 0.015
-0.51	1417.9 ± 1.7	164.4 ± 2.8	-0.018 ± 0.010	0.006 ± 0.012
-0.19	1423.4 ± 1.7	164.3 ± 2.8	-0.022 ± 0.010	0.013 ± 0.012
0.12	1429.0 ± 1.8	161.4 ± 2.9	-0.000 ± 0.010	0.023 ± 0.013
0.44	1436.8 ± 2.1	163.8 ± 3.3	-0.050 ± 0.012	0.016 ± 0.015
0.75	1440.0 ± 2.3	159.7 ± 3.7	-0.028 ± 0.014	0.009 ± 0.017
1.06	1453.1 ± 3.0	150.0 ± 4.5	-0.072 ± 0.017	0.006 ± 0.021
1.38	1443.8 ± 3.4	143.5 ± 5.9	-0.010 ± 0.021	0.048 ± 0.028
1.83	1426.4 ± 2.6	161.4 ± 3.3	0.052 ± 0.015	-0.067 ± 0.016
2.46	1440.8 ± 3.4	136.0 ± 6.1	-0.028 ± 0.022	0.036 ± 0.030
3.23	1434.0 ± 3.4	145.0 ± 5.6	-0.011 ± 0.021	0.030 ± 0.026
4.32	1411.4 ± 3.3	139.1 ± 5.7	0.033 ± 0.021	0.003 ± 0.028
5.88	1396.6 ± 3.9	126.6 ± 6.9	0.108 ± 0.025	0.057 ± 0.038
8.08	1399.8 ± 3.0	162.4 ± 4.1	0.011 ± 0.018	-0.031 ± 0.019
10.76	1426.9 ± 3.4	170.3 ± 5.0	-0.054 ± 0.018	-0.003 ± 0.022
13.97	1422.9 ± 3.7	162.9 ± 6.4	0.033 ± 0.021	0.044 ± 0.028
18.81	1391.9 ± 5.0	153.4 ± 7.9	0.113 ± 0.027	0.041 ± 0.037
27.80	1356.4 ± 5.6	170.2 ± 5.9	0.023 ± 0.034	-0.135 ± 0.029

Tabella 4.3: Cinematica stellare dal fit a due componenti per NGC 1366.

r [arcsec]	L_1/L_{tot}	v_1 [km s ⁻¹]	σ_1 [km s ⁻¹]	v_2 [km s ⁻¹]	σ_2 [km s ⁻¹]
-29.2	0.68	1008.4 ± 5.0	37.3 ± 4.9	1255.7 ± 8.4	8.6 ± 126.7
-20.9	0.69	1019.8 ± 5.3	70.8 ± 4.8	1241.6 ± 3.5	19.5 ± 5.4
-12.6	0.64	1037.7 ± 2.9	76.9 ± 4.0	1247.4 ± 2.0	30.2 ± 2.6
-6.0	0.22	1084.7 ± 39.0	400.0 ± 0.0	1132.1 ± 1.0	94.7 ± 1.9
6.3	0.55	1144.2 ± 71.2	105.7 ± 28.1	1012.5 ± 43.7	82.8 ± 19.7
11.4	0.61	1196.7 ± 3.1	73.1 ± 4.2	998.1 ± 2.4	40.1 ± 2.8
19.9	0.65	1231.9 ± 3.8	42.6 ± 3.4	993.0 ± 3.8	32.3 ± 5.1
28.2	0.75	1233.4 ± 6.9	31.5 ± 9.0	956.9 ± 40.2	89.9 ± 47.4

Tabella 4.4: Indici di Lick per NGC 1366: componente principale.

r [arcsec]	H β [Å]	Mgb [Å]	Fe5270 [Å]	Fe5335 [Å]
-29.2	2.01 ± 0.80	2.42 ± 0.80	2.46 ± 0.84	2.33 ± 0.82
-20.9	2.40 ± 0.32	2.57 ± 0.32	2.70 ± 0.38	2.54 ± 0.35
-12.6	2.85 ± 0.26	2.22 ± 0.26	2.42 ± 0.27	2.32 ± 0.27
-6.0	4.40 ± 0.45	2.03 ± 0.53	2.30 ± 0.62	2.13 ± 0.85
0.0	1.89 ± 0.09	3.38 ± 0.09	3.25 ± 0.09	2.99 ± 0.07
6.3	1.40 ± 0.33	3.67 ± 0.44	3.37 ± 0.35	3.05 ± 0.39
11.4	2.35 ± 0.22	2.44 ± 0.21	2.35 ± 0.25	2.23 ± 0.29
19.9	2.59 ± 0.26	1.87 ± 0.33	1.84 ± 0.39	1.83 ± 0.38
28.2	2.88 ± 0.53	1.65 ± 0.85	1.70 ± 0.86	1.73 ± 0.87

Tabella 4.5: Indici di Lick per NGC 1366: componente controrotante.

r [arcsec]	H β [Å]	Mgb [Å]	Fe5270 [Å]	Fe5335 [Å]
-29.2	2.12 ± 1.71	1.78 ± 1.71	1.58 ± 1.84	0.89 ± 1.84
-20.9	1.72 ± 0.71	2.32 ± 0.79	2.11 ± 0.89	1.32 ± 0.80
-12.6	1.43 ± 0.48	2.51 ± 0.48	2.16 ± 0.47	1.39 ± 0.49
-6.0	1.90 ± 0.13	4.14 ± 0.14	3.99 ± 0.15	4.86 ± 0.20
6.3	4.17 ± 0.38	1.77 ± 0.53	1.87 ± 0.46	1.65 ± 0.53
11.4	2.27 ± 0.36	3.03 ± 0.33	2.94 ± 0.39	2.52 ± 0.44
19.9	2.57 ± 0.51	2.76 ± 0.60	2.47 ± 0.68	2.02 ± 0.68
28.2	4.08 ± 1.71	2.47 ± 2.47	2.30 ± 2.34	1.63 ± 2.38

Bibliografia

- D. G. Algorry et al. Counterrotating stars in simulated galaxy discs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014.
- F. Bertola et al. Counterrotating stellar disks in early-type spirals: NGC 3593. *The Astrophysical Journal*, 1996.
- D. Bettoni et al. The visible environment of galaxies with counterrotation. *Astronomy & Astrophysics*, 2001.
- D. Bettoni et al. A new catalogue of ISM content of normal galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 2003.
- R. Braun et al. Counter-rotating gaseous disks in the 'Evil Eye' galaxy NGC4826. *Nature*, 1992.
- R. Ciri et al. A massive counter-rotating gas disk in a spiral galaxy. *Nature*, 1995.
- L. Coccato et al. Dating the formation of the counter-rotating stellar disc in the spiral galaxy NGC 5719 by disentangling its stellar populations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011.
- L. Coccato et al. Spectroscopic evidence of distinct stellar populations in the counter-rotating stellar disks of NGC 3593 and NGC 4550. *Astronomy & Astrophysics*, 2012.
- L. Coccato et al. The properties and the formation mechanism of the stellar counter-rotating components in NGC 4191. *Astronomy & Astrophysics*, 2015.
- E. D'Onghia et al. Self-perpetuating spiral arms in disk galaxies. *The Astrophysical Journal*, 2013.
- N. W. Evans et al. Separatrix crossing and the enigma of NGC 4550. *The Astrophysical Journal*, 1994.

- D. Fisher et al. The dynamics and structure of the S0 galaxy NGC 7332. *The Astronomical Journal*, 1994.
- G. Galletta. Detection of retrograde gas streaming in the SB0 galaxy NGC 4546. *The Astrophysical Journal*, 1987.
- E. J. Johnston et al. Disentangling the stellar populations in the counter-rotating disc galaxy NGC 4550. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013.
- R. V. E. Lovelace et al. Counterrotating accretion disks. *The Astrophysical Journal*, 1996.
- C. Maraston et al. Stellar population models at high spectral resolution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011.
- L. Morelli et al. Stellar populations of bulges in 14 cluster disc galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2008.
- A. Pizzella et al. Ionized gas and stellar kinematics of seventeen nearby spiral galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 2004.
- A. Pizzella et al. The difference in age of the two counter-rotating stellar disks of the spiral galaxy NGC 4138. *Astronomy & Astrophysics*, 2014.
- H. Rix et al. NGC 4550 - A laboratory for testing galaxy formation. *The Astrophysical Journal*, 1992.
- V. Rubin. Multi-spin galaxies. *The Astronomical Journal*, 1994.
- V. Rubin et al. Cospatial counterrotating stellar disks in the Virgo E7/S0 galaxy NGC 4550. *The Astrophysical Journal*, 1992.
- A. R. Thakar et al. Formation of massive counterrotating disks in spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, 1996.
- A. R. Thakar et al. NGC 4138: a case study in counterrotating disk formation. *The Astrophysical Journal*, 1997.
- A. R. Thakar et al. Smoothed particle hydrodynamics simulations of counterrotating disk formation in spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, 1998.
- D. Thomas et al. Environment and self-regulation in galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010.

- L. Vergani et al. NGC 5719/5713: interacting spirals forming a counter-rotating stellar disc. *Astronomy & Astrophysics*, 2007.
- G. Worthey et al. Old stellar populations. 5: Absorption feature indices for the complete LICK/IDS sample of stars. *The Astrophysical Journal*, 1994.