

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Astronomia

**Classificazione delle galassie:
Caratteristiche morfologiche, fotometriche e
cinematiche**

Tesi di laurea

Presentata da:
Edoardo Tomasina

Relatore:
**Chiar.mo Prof.
Daniele Dallacasa**

Anno Accademico 2018-2019

Non esiste classificazione dell'Universo che non sia arbitraria e congetturale. La ragione è molto semplice: noi non sappiamo cosa sia l'Universo
(Jorge Luis Borges)

Sommario

Lo spettacolo del cielo notturno è un fenomeno che affascina l'uomo di tutte le epoche. Quando ancora l'inquinamento luminoso era poco o inesistente, le persone avevano il privilegio di perdersi fantasticando e ammirando quella fascia bianca e luminosa che dopo ogni tramonto, attraversa il firmamento. Nonostante il fascino che gli oggetti estesi nel cielo esercitavano sugli astronomi, anche moderni, il concetto di galassia come lo conosciamo oggi è stato introdotto in tempi molto recenti. Una prima e rudimentale nozione, risale al filosofo del '700 Immanuel Kant: egli suppose che la nostra Galassia potesse non essere la sola nell'universo e che quelle che all'epoca erano considerate tutte delle deboli nebulose fossero in realtà degli "*universi-isola*" formati da stelle e osservati da distanze incredibilmente grandi. Le galassie non furono universalmente accettate come entità separate dalla Via Lattea fino al 1917, quando si inasprì il Grande Dibattito sulla sua natura, su quella delle nebulose spiraliformi e sulle dimensioni generali dell'Universo. Fu Edwin Hubble nei primi anni '20 a fornire una risposta definitiva. Grazie all'uso del nuovo e più potente telescopio dell'epoca, il telescopio Hooker situato sul Monte Wilson, lo scienziato riuscì a risolvere le parti esterne di alcune nebulose identificandole come insieme di stelle e stabilendo che si trovassero a distanze eccessive per poter appartenere alla Via Lattea. Le galassie vennero finalmente definite come tali e se ne iniziò lo studio e la catalogazione.

Nell'Astrofisica moderna lo studio delle galassie è distinto: in un approccio di tipo **locale**, che si basa sull'analisi delle relazioni tra i sistemi interni alla Galassia; e in un approccio **extragalattico** con il quale le galassie vengono studiate e trattate come gli elementi principali di un sistema più grande (un gruppo, un ammasso di galassie oppure l'Universo stesso), la ricerca in tal senso si basa sull'analisi dei principali parametri morfologici, fotometrici e cinematici e sulle loro relazioni.

L'elaborato che qui propongo si svilupperà seguendo quest'ultimo orientamento, in tale ottica cercherò di riassumere e catalogare le principali proprietà da noi conosciute di questi meravigliosi sistemi.

Indice

1	Introduzione	1
2	Proprietà morfologiche	2
2.1	Sequenza di Hubble	2
2.2	Early-Type	3
2.2.1	Galassie Ellittiche	3
2.2.2	Galassie Lenticolari	4
2.3	Late-Type	4
2.3.1	Galassie a Spirale	5
2.3.2	Galassie Irregolari	6
2.4	Correzioni di De Vaucouleurs	6
3	Proprietà Fotometriche	7
3.1	Fotometria di galassie ellittiche	7
3.1.1	Isofote delle Ellittiche	7
3.1.2	Proiezione di ellissoidi	8
3.1.3	Leggi di scala e piano fondamentale	10
3.2	Fotometria delle galassie a spirale	12
4	Proprietà Cinematiche	13
4.1	Cinematica delle Galassie Ellittiche	14
4.2	Cinematica delle Galassie a Spirale	15
4.2.1	Cinematica del Bulge	15
4.2.2	Cinematica del Disco	15

Capitolo 1

Introduzione

Le galassie, enormi sistemi autogravitanti, possono essere considerate i mattoni fondamentali dell'Universo. Esse sono costituite principalmente da stelle ed ammassi stellari (Cluster) intervallati da immense distese di gas e polveri a bassissima densità costituenti l'ISM, il Mezzo Interstellare. Sono disposte nell'universo formando strutture differenti: dalle associazioni, composte da un numero ristretto di oggetti, agli ammassi e superammassi che ne contengono migliaia. Lo spazio tra di esse, detto Mezzo Intergalattico, è composto da gas a densità ancora minori, circa un atomo per metro cubo.

Le galassie possono avere forma e dimensione estremamente variegata, ed essere dotate di caratteristiche fisiche molto diverse l'una dall'altra, nonostante ciò, la potenza osservativa dell'Astronomia moderna ha permesso la raccolta e la catalogazione di un numero sufficiente di esemplari consentendo agli astrofisici di trattare il fenomeno in maniera statistica e quindi di riconoscere ed evidenziarne gli aspetti principali.

In genere si osserva che:

- Le dimensioni delle galassie non sono affidate al caso ma in media contengono un numero di stelle tra:

$$10^7 \leq N_* \leq 10^{12} \quad (1.1)$$

- le galassie non hanno un confine netto ma si può approssimare che il raggio spazi tra:

$$100pc \leq R_g \leq 50Kpc \quad (1.2)$$

- La velocità delle stelle al loro interno si può identificare tra:

$$50Km/s \leq \sigma_* \leq 400Km/s \quad (1.3)$$

dove σ è detta velocità di dispersione.

Le galassie rappresentano veri e propri **laboratori** dell'Universo in cui mettere alla prova le conoscenze appartenenti a tutti i campi della fisica. Progredire nella loro osservazione è spesso fondamentale per comprendere anche la natura di tutto ciò che ci circonda.

Capitolo 2

Proprietà morfologiche

La morfologia rappresenta il primo passo nella comprensione delle galassie in quanto è correlata con gran parte delle loro proprietà fisiche globali (per esempio momento angolare, tasso di formazione stellare, contenuto di gas, etc..). Essere in grado di capire e riprodurre le forme osservate permette di approfondire le nostre conoscenze sui meccanismi di formazione ed evoluzione.

La classificazione morfologica si basa sull'analisi della forma complessiva di una galassia, di quella delle sue componenti e dello spettro integrato dell'oggetto. Ricavare tali informazioni è un processo estremamente delicato in quanto l'osservazione delle strutture galattiche dipende da numerose variabili quali il tempo d'esposizione, la regione di spettro in cui si è presa l'immagine o il redshift al quale si sta osservando. Inoltre i criteri di classificazione scelti sono sempre relativi all'interpretazione soggettiva dell'osservatore.

In conclusione, sebbene gli schemi di classificazione morfologica adottati sono validi e di fondamentale importanza, è bene non dare loro valore di realtà assoluta.

2.1 Sequenza di Hubble

La classificazione più conosciuta ed utilizzata è sicuramente quella implementata da Hubble nel suo libro *The Realm of the Nebulae* (1926), poi modificata man mano che venivano osservate sempre più galassie.

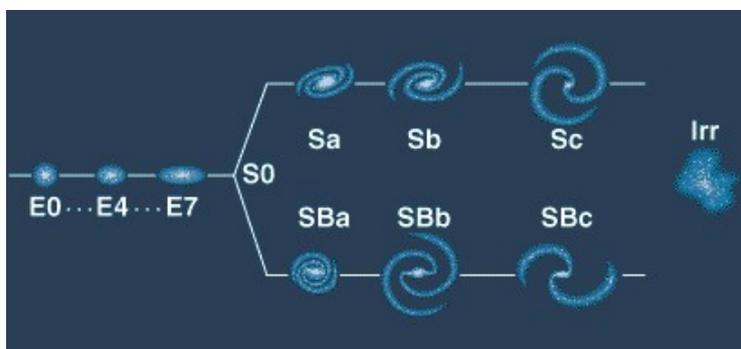


Figura 2.1: *Diagramma a Diapason di Hubble: a sinistra ci sono le Early-type, a destra le Late-type, la congiunzione avviene attraverso le S0*

Hubble costruì la sua sequenza osservando galassie molto luminose e facilmente risolvibili, in genere giganti e supergiganti che si trovano isolate o in piccoli ammassi. Le sue considerazioni riguardo la struttura morfologica degli oggetti che aveva studiato lo portarono a concludere che la sequenza da lui descritta rappresentasse una successione temporale, cioè un'evoluzione di tali sistemi dalla regione delle **Early-Type** alla regione delle **Late-Type**. Il collegamento tra le due categorie era identificato nella struttura delle S_0 , o galassie lenticolari che presentano proprietà in comune ad entrambe. Oggi è risaputo che il modello dell'evoluzione è incorretto, nonostante ciò la classificazione di Hubble viene ancora utilizzata insieme alla sua terminologia.

2.2 Early-Type

In questa categoria vengono raccolte galassie dal profilo regolare e prive di sottostrutture importanti. Sono sistemi spesso considerati "vecchi" per via della popolazione stellare che li compone (prevalenza di nane brune e rosse) e che evidenzia la mancanza di formazione di nuove stelle. Sono inoltre caratterizzate dalla presenza di gas nelle fasi calde e dall'assenza di polveri. La brillantezza superficiale è maggiore nel centro e diminuisce gradualmente man mano che ci si sposta verso il bordo, fino a confondersi con il fondo del cielo intergalattico. In genere si considerano early-type le:

- **Galassie Ellittiche**
- **Galassie Lenticolari**

2.2.1 Galassie Ellittiche

Le galassie ellittiche sono distribuite nell'Universo con forme e dimensioni anche molto variegata, le masse possono alternarsi dai miliardi di masse solari (per esempio le giganti osservate da Hubble), ai pochi milioni che contraddistinguono le fioche **galassie nane** \rightarrow , conosciute come "dE".

La presenza di galassie ellittiche va in funzione della densità locale di galassie, e possono variare dal 10% nelle regioni meno popolate fino al 40% nei centri degli ammassi più densi.

Vengono identificate con il simbolo E_n , e sono classificate in funzione del loro schiacciamento parametrizzato da

$$n = 10[1 - (b/a)] \quad (2.1)$$

Dove con $[(b/a)]$ si definisce la parte intera del **rapporto assiale apparente**. Allora le galassie E0 avranno rapporto $(b/a) = 1$ e si presenteranno in cielo come dei cerchi, mentre le E5, poiché hanno l'asse maggiore che misura il doppio di quello minore, assumeranno una più classica forma ellittica.

Non sono mai state osservate galassie con $E_n > 7$, difatti si può dimostrare con l'applicazione di modelli fluidodinamici che tale ellitticità rappresenti il livello di schiacciamento critico, superato il quale il sistema diverrebbe instabile.

In realtà la definizione della struttura *vera* delle galassie ellittiche è un problema

molto più complicato, si potrebbe per esempio considerare l'ipotesi che le galassie ellittiche siano in realtà tutte manifestazioni della stessa struttura ma osservate ad angoli diversi. Dal momento che, mediante l'applicazione di analisi statistiche e attraverso le osservazioni di traccianti dinamici, si è giunti alla conclusione che in Natura esistono veramente oggetti con un diverso grado di elongazione, si tratta di cercare di comprendere a quale entità tridimensionale corrispondano le strutture che siamo in grado di osservare: infatti gli ellissoidi in 3 dimensioni si possono suddividere in

- ellissoidi di rotazione
 - attorno all'asse minore \rightarrow *ellissoide oblato*
 - attorno all'asse maggiore \rightarrow *ellissoide prolato*
- ellissoide con 3 assi differenti \rightarrow *ellissoide triassiale*

Il problema viene affrontato prendendo in considerazione proprietà di natura fotografica di cui tratterò nel prossimo capitolo.

2.2.2 Galassie Lenticolari

Si pongono a metà del diagramma di Hubble, possedendo caratteristiche in comune con le galassie ellittiche e quelle a spirale. Sono caratterizzate da regioni centrali più luminose rispetto alle componenti esterne che invece seguono una distribuzione di brillantezza più simile alle galassie a spirale e che possono presentare delle polveri. Non hanno strutture evidenti, a parte il rigonfiamento del bulge centrale rispetto al disco piatto circostante (simile a quello delle spirali, ma senza bracci), fenomeno che conferisce la riconoscibile forma "a lente".

Sono generalmente identificate con $S0_n$ e si dividono in:

- Lenticolari normali: suddivise in $S0_1$, $S0_2$ e $S0_3$ in funzione del grado di assorbimento delle polveri nel disco
- Lenticolari barrate: classificate in $SB0_1$, $SB0_2$, $SB0_3$, dove questa volta la suddivisione dipende dalla prominente della barra (dovuta al moto differenziale di rotazione)

2.3 Late-Type

Le galassie late-type si sviluppano nel diagramma di Hubble dopo le galassie lenticolari. Il loro colore integrato è classicamente blu, che è indice della presenza di una popolazione stellare più giovane di quelle ellittiche (e delle S0) e di formazione stellare ancora in atto. La morfologia di tali sistemi è decisamente più complicata ed intrigante a causa della presenza di regioni ricche di gas freddo e polveri. Si suddividono in:

- Galassie a spirale
- Galassie irregolari

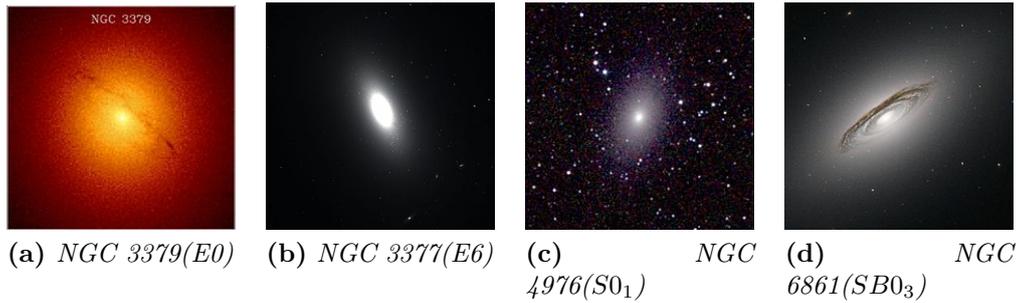


Figura 2.2: *Esempi di galassie ellittiche e lenticolari*

2.3.1 Galassie a Spirale

Costituiscono la categoria più rappresentativa del gruppo delle late-type e sono di gran lunga le galassie più famose ed appariscenti. Nell’Universo si trovano principalmente in regioni a bassa densità mentre sono quasi del tutto assenti nelle regioni centrali degli ammassi.

Sono formate da un disco rotante caratterizzato da un momento angolare anche 5 volte superiore rispetto a quello delle galassie ellittiche. La sua composizione è formata da agglomerati di gas freddi, polveri, ammassi aperti e stelle giovani (Pop.I) molto calde che conferiscono il colore blu allo spettro integrato. Il disco è dotato di una struttura complessa in quanto si distribuisce in una regione interna spessa ”solo” qualche centinaio di parsec, il **thin disk** da cui si diramano i bracci a spirale, che è contenuta a sua volta in una struttura più espansa, il **thick disk** che misura qualche kpc di spessore. I bracci sono regioni di elevata densità e si pensa che stiano alla base della formazione stellare; essi si allungano dal centro della galassia per qualche migliaio di parsec.

Nelle regioni centrali si condensa un nucleo brillante e rigonfio detto **bulge** che per colore e morfologia è simile ad una minuscola galassia ellittica, spesso (come nel caso della Via Lattea) al suo interno vi sono evidenze della presenza di un *Buco nero supermassiccio*.

Infine, all’esterno, un alone sferico di bassissima densità circonda il piano della galassia ed è composto da stelle di popolazione più vecchia, ammassi globulari e gas. la classificazione delle spirali si suddivide in funzione della forma del bulge: S se il bulge possiede simmetria sferica, Sb se presenta una struttura allungata: in tal caso viene detto ”barrato”, ed i bracci a spirale vengono emanati dagli estremi della barra. Entrambi le classi di spirali inoltre si suddividono a loro volta in tre tipologie: a, b, c. In particolare, i criteri usati per la distinzione sono:

- Le dimensioni e la luminosità del bulge rispetto a quelle del disco
- il grado di avvolgimento dei bracci
- la capacità di di risoluzione delle spirali nelle singole stelle e nebulose emittenti (regioni HII)

Dunque esistono galassie Sa e SBa (spirali early-type) dotate di un bulge molto grande e con poco gas, i bracci piuttosto avvolti, sono generalmente ben definiti ma

non molto risolvibili. Dal lato opposto le galassie di categoria Sc e SBc (spirali late-type) possono anche non presentare quasi traccia del bulge e possiedono bracci molto aperti e ben risolti; gli stadi centrali ed intermedi sono designati dalle categorie Sb e SBb.

2.3.2 Galassie Irregolari

Le galassie irregolari sono galassie prettamente asimmetriche e generalmente di piccola massa. Sono molto diffuse nell'Universo ma brillano di luce piuttosto debole. Sono ricche di gas e dotate di una popolazione stellare relativamente giovane. Hubble le suddivise in 2 sottoclassi:

- Irr I: oggetti ben risolti e mostranti una popolazione di stelle, prevalentemente O e B, ma prive di simmetrie o bracci definiti.
- Irr II: galassie caotiche e disturbate che presentano regioni estinte dalla polvere.

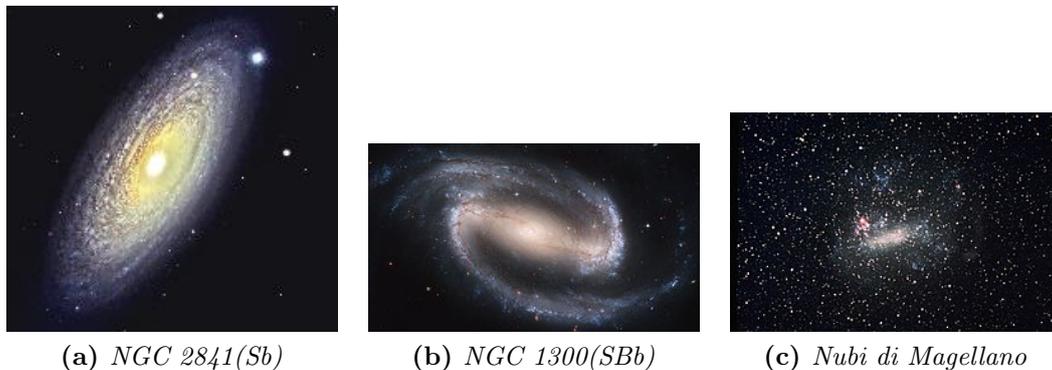


Figura 2.3: Le prime 2 immagini sono esempi rappresentative di galassie a spirale, normale e barrata. A destra le nubi di magellano i più famosi esempi di galassie irregolare

2.4 Correzioni di De Vaucouleurs

Il lavoro di Hubble fu apprezzato e diffuso in tutto il mondo; nonostante ciò nel tempo vennero mosse delle critiche orientate soprattutto sul suo sistema di catalogazione delle spirali e delle irregolari. In particolare l'astronomo francese De Vaucouleurs estese la sequenza delle spirali introducendo le classi Sd, Sm e Im in modo da sostituire la Irr I ed introdusse la notazione SA e SAB in cui collocare, rispettivamente, galassie del tutto prive di barre e galassie dotate di una debole barra. Lo scienziato inoltre studiò il caso morfologico delle galassie barrate presentanti struttura ad anello che indicò con "r", di conseguenza con "s" indicò il caso della presenza dei soli bracci a spirale e con "rs" le varietà intermedie. Detto a il semiasse maggiore della barra di una galassia, essa può presentare un *anello nucleare* se $r/a < 1$, un *anello interno* se $r/a \simeq 1$, un *anello esterno* se $r/a > 1$; esistono esempi che presentano tutti e 3 i casi.

Capitolo 3

Proprietà Fotometriche

La Fotometria, è la tecnica di misurazione del flusso o dell'intensità della radiazione di una sorgente luminosa, allo scopo di ottenere informazioni quantitative sulle dimensioni, sulla temperatura (quindi il colore) ed altre proprietà fisiche della sorgente stessa. In particolare, in questo elaborato tratteremo della **Brillanza** (o luminosità) **superficiale I**, una grandezza fotometrica sfruttata per costruire un profilo di luminosità degli oggetti estesi che consenta di indagare la distribuzione della luce emessa. Per ciascun punto di una sorgente estesa si definisce:

$$I = F/\Omega \quad [L_{\odot}pc^{-2}] \quad (3.1)$$

Dove F è il flusso in unità solari e Ω è l'angolo solido che attraversa (in unità di $parsec^2$).

3.1 Fotometria di galassie ellittiche

Indagando la distribuzione della luminosità sulla superficie delle galassie ellittiche è possibile risalire alla forma *vera* che possiedono rispondendo così al quesito introdotto nel capitolo 2.

3.1.1 Isofote delle Ellittiche

Iniziamo introducendo il fondamentale concetto di **isofota**, definita come la regione dei punti che possiedono la stessa brillantezza superficiale. Generalmente vengono descritte ognuna con il proprio **diametro** (o raggio) **isofotale**, che corrisponde al diametro in cui viene raggiunto un particolare livello di brillantezza.

Le isofote osservate sono generalmente ellittiche, cioè dette x e y le coordinate rispetto al centro, rispettano una relazione del tipo

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (3.2)$$

e quindi

$$R_{iso} = a \sqrt{\frac{(1 - e^2)}{1 - e^2 \cos^2(\phi)}} \quad (3.3)$$

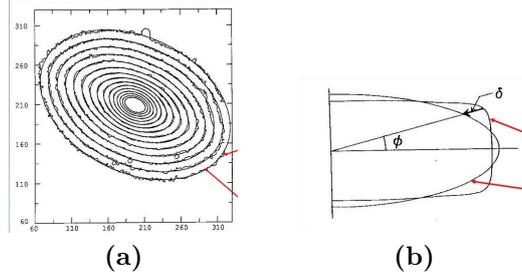


Figura 3.1: isofote di galassie ellittiche, nell'immagine a destra si evidenzia la deviazione da un'ellissi perfetta

dove a e b sono i semiassi dell'ellissi, e l'ellitticità apparente.

Talvolta però le curve non sono perfettamente ellittiche ma presentano delle deviazioni. Allo scopo di quantificarle si definisce una R_{ell} che fitti l'isofota considerata e al variare dell'angolo ϕ (calcolato rispetto al centro) se ne ricava la distanza dai punti descritti dalla curva vera. Tale distanza $\delta(\phi)$ è espressa come una serie di Fourier:

$$\delta(\phi) = R_{ell} - R_{iso} = \bar{\delta} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\phi) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\phi) \quad (3.4)$$

Allora si vede che le deviazioni sono descritte dai parametri

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \delta(\phi) \cos(n\phi) d\phi \quad (3.5)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \delta(\phi) \sin(n\phi) d\phi \quad (3.6)$$

In particolare, se l'isofota è simmetrica e l'ellisse è stata fittata correttamente l'unico parametro rilevante è A_4 : Se $A_4 < 0$ l'isofota è detta **Boxy**, se $A_4 > 0$ l'isofota è detta **Disky**. Dunque la quantità A_4/a è la **Diskiness**¹.

3.1.2 Proiezione di ellissoidi

Riprendiamo ora il problema introdotto nel secondo capitolo riguardante la ricostruzione della struttura tridimensionale di una galassia ellittica a partire dalle immagini 2-D ricavate dalle osservazioni. Le galassie, relativamente alla proiezione, sono oggetti *trasparenti* in quanto la probabilità che una stella escluda l'informazione di un'altra tende a zero². Calcoliamo allora la proiezione di un oggetto a simmetria generica e trasparente. Si definiscono: $\vec{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ le coordinate nel sistema di riferimento dell'osservatore e $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)$ quelle nel riferimento della galassia. Detta $\rho(\vec{x})$ la densità definita in ogni punto del sistema e introdotta una matrice di rotazione ortogonale \mathcal{R} , allora varrà $\vec{\xi} = \mathcal{R}\vec{x}$ e quindi $\vec{x} = \mathcal{R}^T\vec{\xi}$. Fissato il piano di proiezione, cioè scelti (ξ_1, ξ_2) , e definita la *linea di vista* ξ_3 , L'immagine di un

¹Nel 1996 Kormendy e Bender introdussero nella sequenza delle ellittiche della classificazione di Hubble, le galassie boxy e diskly

²Si considerano le stelle come punti euclidei di dimensione nulla

singolo punto nel piano sarà data dalla somma dei punti che essa incontra

$$\Sigma(\xi_1, \xi_2) = \int \rho(\mathcal{R}^T \xi_3) d\xi_3 \quad (3.7)$$

L'**immagine** completa sarà data dalla somma su tutta l'area di proiezione

$$\iint \Sigma(\xi_1, \xi_2) == \iiint \rho(\mathcal{R}^T \vec{\xi}_3) d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 = \int_V \rho d\vec{\xi} \quad (3.8)$$

Che dipende da un integrale in volume e quindi, nota ρ , a partire dall'immagine possiamo ricavare il volume 3-D dell'oggetto. Alla luce di ciò studiamo ora come si comporta la proiezione di un ellissoide concentrico e trasparente nel piano del cielo. Consideriamo la superficie di un ellissoide:

$$m^2 = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \quad (3.9)$$

gli assi sono allineati e m è un parametro che indica le dimensioni dell'ellissoide. Detta $\rho(m)$ la densità della galassia, studiamone la proiezione supponendo di essere infinitamente distanti dall'oggetto osservato, così da poter assumere che avvenga lungo linee di vista parallele. Possiamo riscrivere l'equazione (3.9) come una forma quadratica

$$m^2 = \langle \mathcal{D}\vec{x}, \vec{x} \rangle \quad \text{con} \quad \mathcal{D} = \mathcal{D}^T = \begin{pmatrix} 1/a^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/b^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/c^2 \end{pmatrix}$$

cioè, sostituendo le relazioni precedenti:

$$m^2 = \langle \mathcal{D}\mathcal{R}\vec{\xi}, \mathcal{R}\vec{\xi} \rangle = \langle \mathcal{R}^T \mathcal{D}\mathcal{R}\vec{\xi}, \vec{\xi} \rangle \quad (3.10)$$

e chiamiamo $P = \mathcal{R}^T \mathcal{D}\mathcal{R}$ che è una matrice simmetrica, definita positiva. Se ora scomponiamo in versori il vettore $\vec{\xi} = \vec{\xi}_\perp + \xi_3 \hat{e}_3$, allora $m^2 = \langle \mathcal{P}\vec{\xi}, \vec{\xi} \rangle = \langle \mathcal{P}\vec{\xi}_\perp + \xi_3 \mathcal{P} \hat{e}_3, \vec{\xi}_\perp + \xi_3 \hat{e}_3 \rangle$.

Sviluppando il prodotto e sfruttando le proprietà di \mathcal{P} otteniamo

$$m^2 = \langle \mathcal{P}\vec{\xi}, \vec{\xi} \rangle = \xi_3^2 \underbrace{\langle \mathcal{P} \hat{e}_3, \hat{e}_3 \rangle}_{A \geq 0} + 2\xi_3 \underbrace{\langle \mathcal{P}\vec{\xi}_\perp, \hat{e}_3 \rangle}_B + \underbrace{\langle \vec{\xi}_\perp, \vec{\xi}_\perp \rangle}_{C \geq 0} \quad (3.11)$$

cioè un'equazione di secondo grado in ξ_3 , identificata da un *trinomio positivo* di coefficienti A, B e C (poiché \mathcal{P} è definita positiva). L'immagine allora si ricava integrando lungo ξ_3 , applico (3.7):

$$\Sigma(\xi_1, \xi_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\sqrt{A\xi_3^2 + 2B\xi_3 + C}) d\xi_3$$

Detta $L^2 > 0 = C - \frac{B^2}{A}$ così da poter riscrivere il radicando, eseguiamo un cambio di variabile ed otteniamo: $\Sigma(\xi_1, \xi_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\sqrt{t^2 + L^2}) \frac{dt}{\sqrt{A}}$ Qualunque sia l'integrale, la soluzione è sicuramente una funzione di L:

$$\Sigma(\xi_1, \xi_2) = \frac{F(L)}{\sqrt{A}} \quad (3.12)$$

Affinché ciò rappresenti un'isofota $\Sigma(\xi_1, \xi_2)$, deve essere costante, quindi $L = \text{costante}$. Allora se L è una funzione quadratica costante, definita positiva in $\xi_1, \xi_2 \Rightarrow \Sigma(\xi_1, \xi_2) = \text{ELLISSE}$.

Abbiamo raggiunto il fondamentale risultato che le ellissi osservate sono sempre prodotte da ellissoidi. Ciò consente di ricavare l'originale forma 3-D di un galassia ellittica a partire dall'osservazione delle isofote. In particolare, se le ellissi prodotte sono **coassiali** l'ellissoide vero è di rotazione (prolato oppure oblato); d'altra parte se gli assi delle isofote concentriche non coincidono si ha il fenomeno dell' **Isophotal twisting**, cioè le ellissi proiettate sono ruotate, e allora l'ellissoide originale è **triassiale** ($a \neq b \neq c$).

3.1.3 Leggi di scala e piano fondamentale

Studiando le isofote di una galassia ellittica possiamo scoprire come sia variabile l'andamento della brillantezza superficiale in funzione della distanza dal centro. Si definiscono così, a partire dalle immagini osservate i **profili radiali di brillantezza I(R)**.

Supponiamo per semplicità che le galassie ellittiche abbiano simmetria molto vicino a quella sferica, allora detta

$$L(R) = 2\pi \int_0^R I(r)rdr \quad (3.13)$$

la luminosità integrata fino al raggio R , possiamo definire un quantità detta **Raggio effettivo R_e** che corrisponde al raggio del cerchio che contiene metà della Luminosità totale:

$$\frac{L_{tot}}{2} = 2\pi \int_0^{R_e} I(r)rdr \quad (3.14)$$

Il vantaggio dell'introduzione di questo parametro (scoperto da De Vaucouleurs) è che non dipendendo dal fit, esso è valido applicato ad ogni galassia.

Possiamo adesso procedere ad introdurre una serie di **Leggi di scala**, di natura puramente empirica, fondamentali nell'analisi fotometrica di una galassia ed in grado di restituire relazioni utili per determinare le distanze degli oggetti osservati.

1): legge $r^{\frac{1}{4}}$, formulata anch'essa da De Vaucouleurs, descrive il profilo radiale di brillantezza delle galassie ellittiche (e dei bulge sferoidali nelle spirali) in funzione proprio del raggio effettivo:

$$I(R) = I_e e^{-7.67[(R/R_e)^{\frac{1}{4}} - 1]} \quad (3.15)$$

dove I_e è ovviamente la brillantezza superficiale quando $R = R_e$. Questa relazione rappresenta al meglio la maggior parte delle galassie ellittiche, nonostante ciò, essa è un'equazione a due parametri liberi. Quando si studiano casi che deviano in maniera importante dalla legge $r^{\frac{1}{4}}$ è utile riferirsi a leggi più generiche a tre parametri liberi. Per poter rappresentare tutta la molteplicità dei sistemi osservati ne esistono molte, la principale è la formulazione generale della relazione di De Vaucouleurs, ed è chiamata **Legge di Sersic** (Sersic 1963, Ciotti 1991):

$$I(R) = I_e e^{-b(m)(R/R_e)^{\frac{1}{m}-1}} \quad (3.16)$$

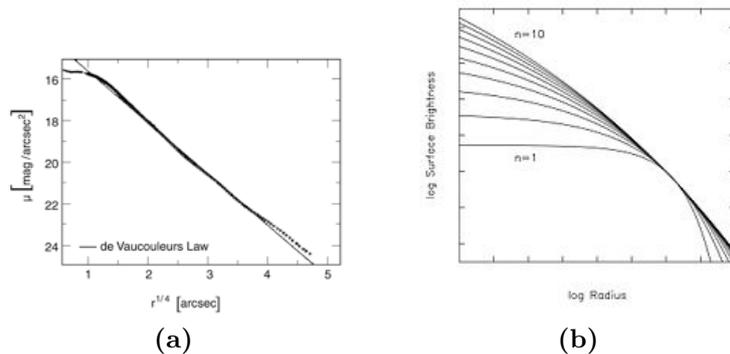


Figura 3.2: A sinistra il profilo modellato da De Vaucouleurs che fitta precisamente la distribuzione delle galassie. A destra il profilo di Sersic che devia da quello di de Vaucouleurs al variare di m

Dove il terzo parametro libero è il denominatore della potenza dell'esponentiale, cioè m . Per la maggior parte dei casi si ha $m \simeq 4$, per $m < 4$ si hanno galassie piccole e deboli, per $m > 4$ si hanno galassie grandi e luminose.

2) Legge di Faber-Jackson, formulata nel 1967, descrive una correlazione tra la Luminosità totale e la dispersione di velocità delle stelle in una galassia:

$$L_{tot} \propto \sigma^4 \quad (3.17)$$

le galassie osservate si distribuiscono come una fascia nel grafico $\log L - \log \sigma$, l'ampiezza di tale banda rappresenta l'incertezza $\Delta L \simeq 40\%$,

3) Legge di Kormendy, formulata nel 1978, mette in relazione la luminosità con il raggio effettivo

$$L \propto R_e \quad (3.18)$$

e sottolinea quindi che le galassie ellittiche più grandi sono quelle più luminose. Anche questa legge possiede un'incertezza $\Delta L \simeq 40\%$

Infine, si può dimostrare l'esistenza di una relazione tra $R_e - \sigma$ attraverso una legge che lega D_n (diametro fotometrico) alla dispersione di velocità, rappresentata da una fascia nel piano $\log \sigma - \log R_e$ associata ad un'incertezza dell'ordine del 40%.

Si evidenzia quindi che per descrivere le proprietà fotometriche di una galassia sembrano essere fondamentali solo le relazioni tra i parametri $L - R_e - \sigma^3$. Prese singolarmente le relazioni presentano un grado di errore piuttosto elevato ma se vengono rappresentate in uno spazio parametrico (di assi L, R_e, σ ovviamente) allora si evidenzia che le galassie ellittiche si distribuiscono su di un piano individuato dall'equazione

$$\alpha \log L + \beta \log \sigma + \gamma \log R_e = \delta \quad (3.19)$$

con una dispersione $< 5\%$. Tale piano è conosciuto come **Piano Fondamentale delle Galassie ellittiche** ed è di estrema importanza poiché conosciuti per esempio, R_e e σ si ricava L tramite la quale, applicando la relazione

$$d = \sqrt{\frac{L}{4\pi l}} \quad \text{con } l \text{ luminosità osservata} \quad (3.20)$$

³La scelta di questi parametri non è arbitraria ma deriva dall'applicazione di tecniche statistiche sofisticate come la PCA: Principal Component Analysis

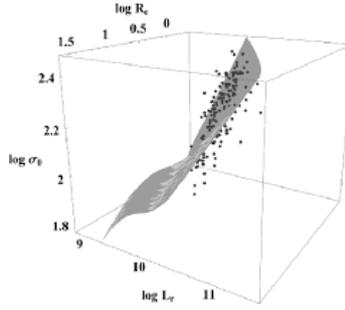


Figura 3.3: *Rappresentazione 3D del piano fondamentale*

è possibile ricavare la distanza dell'oggetto con un errore $\simeq 5\%$. Se si proietta il Piano Fondamentale su ciascun piano individuato dalle leggi di scala allora si ottiene una fascia con dispersione del 40% e ciò significa che il piano è inclinato rispetto a tutte e tre le relazioni e che nessuna di esse, se prese singolarmente, rappresenta la descrizione esatta di una galassia.

Il fatto che i parametri che descrivono le galassie possano variare con α e γ che oscillano attorno a 1 e β attorno a 2, prova che esse siano sistemi *debolmente omologhi*.

3.2 Fotometria delle galassie a spirale

Le galassie a spirale sono oggetti più complessi da analizzare rispetto a quelle ellittiche. La complessità deriva dalla presenza di più sottostrutture diverse come il bulge, il disco, i bracci ed eventuali barre ed anelli. Inoltre, una galassia a spirale non può essere considerata trasparente a causa della presenza della polvere, che ne rende il profilo di brillantezza estremamente dipendente dalla sua posizione rispetto all'osservatore, per via degli effetti di scattering. La fotometria delle galassie a spirale viene eseguita adoperando operazioni di **decomposizione** degli elementi principali: si analizza singolarmente il contributo di ogni sottostruttura (prevalentemente Bulge e disco) e poi si sommano i risultati $\rightarrow I_{tot} = I_{bulge} + I_{disco}$. Se si assume il bulge sferico e descritto da isofote ellittiche, la legge parametrica che ne fitta il profilo di brillantezza è in buon accordo con la legge $r^{\frac{1}{4}}$. Il disco viene normalmente considerato piatto e descritto a sua volta da isofote con ellitticità costanti, il profilo di brillantezza è descritto da una legge esponenziale conosciuta come **Legge di Freeman** (1970):

$$I(r) = I_0 e^{-r/h} \quad (3.21)$$

con h raggio di scala. La somma dei due profili è in genere in buon accordo con le osservazioni.

Esistono, però, profili che presentano anche grandi deviazioni dal modello principale e che vanno corretti introducendo apposite parametrizzazioni; in particolare viene utilizzata la *legge esponenziale di tipo II*:

$$I(r) = I_0 e^{-(r+h)+(r_c/r)^3} \quad (3.22)$$

con r_c detto *raggio di cut-off*, per fittare i profili al di sotto della legge di Freeman che presentano bulge a barra e buchi nel disco.

Capitolo 4

Proprietà Cinematiche

La cinematica è quella branca della fisica che studia il moto dei corpi indipendentemente dalle cause che lo generano. Quando si osserva un oggetto nell'Universo, se ne ricava una velocità complessiva \vec{V} , che è data dalla somma della componente trasversale rispetto al raggio che lo unisce al Sole (o alla Terra), detto **moto proprio** v_{\perp} , più una componente in avvicinamento o in allontanamento, quindi diretta lungo la congiungente, detta **moto radiale** v_{rad} . In astrofisica per studiare la cinematica dei corpi, si può misurare il moto proprio calcolando lo spostamento dell'oggetto rispetto al fondo del cielo, ed il moto radiale studiando le variazioni nel suo spettro d'emissione. Infatti sfruttando il fenomeno dell'**effetto Doppler**, cioè lo spostamento delle lunghezze d'onda in funzione del moto della sorgente rispetto all'osservatore, è possibile ricavare la velocità a cui ciò avviene. Detto z il *redshift* che descrive la variazione osservata della lunghezza d'onda:

$$z = \frac{\lambda_{oss} - \lambda_0}{\lambda_0} \quad (4.1)$$

dove λ_0 è la lunghezza d'onda a riposo misurata in laboratorio, applicando la formula dell'effetto Doppler (non relativistico $v \ll c$) si ricava la velocità *radiale* della sorgente che emette la riga $z = \frac{v}{c} \Rightarrow v_{rad} = zc = \frac{\Delta\lambda/\lambda}{c}$
Lo studio della cinematica delle galassie si suddivide in:

- Cinematica globale: si occupa di studiare il moto di una galassia nel suo insieme.
- Cinematica interna: posizionandosi nel sistema di riferimento della galassia, si occupa di studiare il moto delle stelle che la compongono

In questo elaborato ci concentreremo su quest'ultimo approccio. Mediante l'applicazione di una tecnica spettroscopica nota come *long slit spectroscopy* si punta su un determinato asse di simmetria di una galassia e se ne ricava la somma degli spettri degli oggetti lungo la linea di vista: lo spettro composto così ottenuto presenterà righe allargate e spostate. Per farne un'analisi quantitativa si definisce una funzione di distribuzione delle velocità \Rightarrow **LOSVD**, $F(v_{los})^1$, tale che la frazione di stelle con una certa v_{los} sia data da $F(v_{los})dv_{los}$. Studiando le caratteristiche di questa funzione di distribuzione possiamo ricavare le principali proprietà cinematiche delle

¹ v_{los} sta per "line of sight velocity"

galassie osservate e costruire una **curva di rotazione**, cioè un grafico che indichi la componente, sulla linea di vista, della velocità media di ogni punto della galassia in funzione della sua distanza dal centro.

4.1 Cinematica delle Galassie Ellittiche

Analizzare gli spettri delle ellittiche è relativamente semplice grazie all'assenza dell'estinzione causata dalle polveri. Per studiarne la cinematica interna in genere si punta la slit lungo l'asse maggiore della galassia e se ne ricava la LOSVD. Le osservazioni mostrano che la distribuzione di velocità è ragionevolmente simile ad una gaussiana, e ciò consente di ricavare facilmente i momenti delle velocità come il valore medio \bar{v}_{los} e la dispersione σ_{los} . Ora, ci si aspetta di trovare che il moto delle singole stelle non sia completamente casuale ma abbia una componente sistematica di rotazione lungo l'asse maggiore che giustifichi l'appiattimento dell'ellisse. Ciò che si ottiene, però, è che la velocità di rotazione richiesta per generare tale appiattimento è generalmente maggiore delle velocità osservate: ciò viene parametrizzato dal rapporto

$$(v/\sigma)^* = \frac{\bar{v}_{max} \sigma_0}{(\bar{v}_{max} \sigma_0)_{model}} \quad (4.2)$$

dove \bar{v}_{max} è il massimo dei valori medi \bar{v}_{los} e σ_0 la dispersione di velocità media ottenuta in una regione vicino al centro. Il denominatore dell'equazione è il valore di velocità aspettato per giustificare l'appiattimento. Sebbene si trovi che nelle galassie mediamente brillanti ($-20 < M_B < -18$) tale rapporto sia in effetti $(v/\sigma)^* \simeq 1$, nelle galassie più grandi e brillanti $(v/\sigma)^*$ sembra essere sostanzialmente minore dell'unità². Per approfondire tale problema è necessario indagare più finemente la LOSVD, studiandone la *skeweness* h_3 e la *kurtosis* h_4 . La natura della cinematica stellare nelle galassie ellittiche si rivela dunque essere dominata dai moti casuali dei quali possiamo trarre informazioni solamente studiandone la dispersione di velocità e la sua variazione con il raggio. Di conseguenza la struttura delle orbite è di difficile previsione, a tal punto che anche studiare la distribuzione della massa è un'impresa non semplice, poiché fitta diversamente all'applicazione di diversi modelli orbitali. Tutto ciò rende complicato il determinare ed il quantificare l'esistenza di un alone di materia oscura attorno alle galassie ellittiche. L'unico profilo di distribuzione della massa sufficientemente preciso è quello ricavato a piccoli raggi: è facile verificare che allontanandosi dal centro galattico (che è anche la regione più luminosa quindi probabilmente quella più massiva) la concentrazione di materia cala bruscamente e di conseguenza le distribuzioni di velocità devono diminuire con essa. Infine, un comportamento peculiare si trova nelle regioni centrali di quasi un quarto delle galassie osservate (un esempio rilevante è IC 1459), esse sono chiamate **KDC**, kinematically-distinct core, e sono caratterizzate da un nucleo che ruota, in opposizione alla galassia, attorno all'asse minore. Dato che le KDCs ruotano velocemente, la spiegazione di questo fenomeno potrebbe essere associata alla presenza di una simmetria di classe *disky* che dimostrano di avere velocità di rotazione maggiore delle *boxy*.

²la statistica è ancora troppo povera di elementi per poter analizzare questo comportamento per le galassie più deboli come le nane sferoidali

4.2 Cinematica delle Galassie a Spirale

Avendo una struttura più complessa, l'interpretazione della cinematica delle galassie a spirale è più complicata di quelle ellittiche. A piccoli raggi dominano i moti casuali e la densità di stelle è maggiore; a raggi maggiori la densità diminuisce ma non bruscamente come nelle ellittiche, la componente di moto random è ancora significativa ma domina il moto rotazionale concorde con il disco. Diviene utile, come nello studio della fotometria, decomporre il sistema.

4.2.1 Cinematica del Bulge

A causa della contaminazione luminosa proveniente dal disco essa è più difficile da determinare rispetto a quella delle galassie ellittiche, nonostante ciò, se la galassia è inclinata *face-on* (inclinazione=0°), è relativamente facile calcolare la dispersione di velocità centrale. Combinando queste misure con quelle fotometriche si scopre che questi sistemi vivono nello stesso piano fondamentale delle ellittiche e soddisfano la relazione $D_n - \sigma$, presentando però velocità rotazionali maggiori ed un rapporto $(v/\sigma)^* \simeq 1$.

4.2.2 Cinematica del Disco

Le stelle nel disco possiedono un moto prevalentemente ordinato seguendo orbite quasi circolari attorno al centro e presentando pochi moti casuali; l'asimmetria introdotta da quest'ultimi può essere valutata calcolando le costanti di Oort.

La curva di rotazione delle stelle del disco presenta grandi somiglianze con quella del gas che lo compone: vicino al centro aumenta rapidamente con l'aumentare del raggio $V(R) \propto R$ (Curva di corpo rigido), allontanandosi diminuisce dolcemente fino a mantenere un profilo costante $V(R) = \text{cost}$. Le recenti osservazioni radioastronomiche (a 21 cm) hanno dimostrato l'esistenza di un vastissimo disco di HI circondante il disco stellare, che fornisce la densità necessaria per mantenere il profilo costante. In seguito, per giustificare la stabilità e la mancanza di una caduta kepleriana nella curva di velocità del disco di idrogeno neutro, è stata scoperta l'esistenza di un alone a simmetria sferica di materia oscura di densità $\rho \propto \frac{1}{R^2}$. La materia oscura nel caso delle galassie a spirale allora è ben determinabile proprio grazie alla presenza del disco di HI, e in alcuni casi, soprattutto a basse luminosità, sembra che essa prevalga ad ogni raggio su quella ordinaria, costituendo fino al 90% della massa della galassia. Molti scienziati inizialmente interpretarono erroneamente la curva di velocità delle stelle e per giustificarla introdussero la materia oscura; in realtà il disco stellare non può fornire nessuna prova della sua esistenza.

In alcune galassie, in particolare per certe lenticolari S0, il disco presenta il fenomeno della *contro-rotazione*, per cui una certa regione di stelle ruota in senso opposto alla direzione principale. Infine, si è dimostrato empiricamente che nella regione costante della curva di velocità il disco rispetti una legge di scala detta di Tully-Fisher: $L \propto V^4$.

Lo studio della cinematica del disco di rotazione è alla base della teoria dei bracci a spirale che si sono dimostrati non essere dei corpi rigidi in moto differenziale attorno al centro, bensì più simili a delle *onde di densità*.

Bibliografia

Ciotti L., 2019, *Appunti di astrofisica extragalattica*

Corsini E. M., 2013-2014, *Cinematica delle galassie*, http://www.astro.unipd.it/~bertola/NO/lezioni/Cinematica_delle_galassie.pdf

Corsini E. M., 2014-2015b, *Fotometria superficiale delle galassie*, http://www.astro.unipd.it/~bertola/NO/lezioni/Fotometria_delle_galassie.pdf

Corsini E. M., 2014-2015a, *Morfologia e classificazione delle galassie*, http://www.astro.unipd.it/~bertola/NO/lezioni/Morfologia_delle_galassie.pdf

H. Karttunen P. Kroger H. O. M. P. K. J. D., 2007, *Fundamental Astronomy*

J.Binney M., 1998, *Galactic Astronomy*

J.Binney S., 2008, *Galactic Dynamics*