

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Astronomia

Classificazione delle galassie: caratteristiche morfologiche, fotometriche e cinematiche

Elaborato finale

Presentata da:
Gloria Angeletti

Relatore:
Chiar.mo Prof. Daniele Dallacasa

Sessione estiva
Anno accademico [2015-2016]

Indice

Introduzione	2
1 Classificazione morfologica	3
1.1 Sequenza di Hubble	3
2 Modifiche sulla sequenza di Hubble	8
2.1 Classificazione di De Vaucouleurs	8
3 Abbondanze relative delle tipologie di galassie nell'universo	10
4 Caratteristiche fotometriche e cinematiche	11
4.1 Profili di brillantezza	11
4.1.1 Galassie ellittiche	11
4.1.2 Galassie a spirale	13
4.2 Curve di rotazione	14
4.2.1 Galassie ellittiche	14
4.2.2 Galassie a spirale	14
Bibliografia	17

Introduzione

In questo elaborato viene trattata la classificazione delle galassie ellittiche e a spirale. Per quanto riguarda gli aspetti morfologici viene in primo luogo esposta la sequenza di Hubble e in seguito tutte le sue declinazioni.

Dopodichè viene svolta la parte che tratta gli aspetti fotometrici, ovvero i profili di brillantezza delle galassie con le eventuali formule.

Infine vengono considerate le caratteristiche cinematiche, trattando le curve di rotazione, che sono fondamentali per comprendere la dinamica delle galassie.

Le galassie sono agglomerati di stelle dinamicamente stabili, cioè tenuti in equilibrio dalle forze gravitazionali. Sono quindi strutture autogravitanti formate oltre che da stelle, da gas e polveri. Questi oggetti popolano numerosi l'Universo distribuendosi in modo non omogeneo.

È solo da pochi decenni però che si è compreso che cosa sono effettivamente le galassie. Quando gli strumenti di osservazione non erano così potenti come quelli di oggi, infatti, esse apparivano come piccole regioni luminose dall'aspetto nebuloso, non risolto, presenti in tutte le direzioni sulla volta celeste.

Fino all'inizio degli anni '20 si pensava che queste cosiddette nebulose spirali fossero oggetti appartenenti alla nostra galassia, della quale ancora non si conoscevano esattamente le dimensioni.

Nell'universo osservabile sono presenti probabilmente più di 100 miliardi di galassie gran parte di esse ha un diametro compreso fra 1000 e 100000 parsec e sono di solito separate da distanze dell'ordine di milioni di parsec. Lo spazio intergalattico è parzialmente colmato da un tenue gas, la cui densità è inferiore ad un atomo al metro cubo. I dati provenienti dalle osservazioni inducono a pensare che al centro di molte galassie, sebbene non di tutte, esistano dei buchi neri supermassicci; la presenza di questi singolari oggetti spiegherebbe l'attività del nucleo delle galassie cosiddette attive. Tuttavia la loro presenza non implica necessariamente che la galassia che li ospita sia attiva, dato che anche la Via Lattea sembrerebbe nascondere nel suo nucleo uno di questi buchi neri.

Capitolo 1

Classificazione morfologica

Riprodurre la varietà delle forme osservate è uno degli obiettivi principali di tutte le teorie di formazione ed evoluzione delle galassie, per questo, in questo elaborato, verranno classificate in base agli aspetti morfologici, fotometrici e cinematici. Le caratteristiche morfologiche di una galassia sono il primo passo verso la loro classificazione e sono correlate con moltissime proprietà globali, per esempio popolazioni stellari, momento angolare, tasso di formazione stellare, contenuto di gas, ambiente. Per classificazione morfologica, si intende il raggruppamento in classi di galassie con gli stessi parametri usati nella descrizione della struttura.

1.1 Sequenza di Hubble

Attorno alla metà del 1900, un astrofisico statunitense di nome Edwin Powell Hubble elaborò quella che oggi è definita la più importante classificazione di tipo morfologico riguardante le galassie della storia. Dopo vari ritocchi, nel 1961 venne pubblicata la versione definitiva della classificazione nota come classificazione di Hubble-Sandage, in cui l'astronomo Sandage aveva apportato qualche modifica. La sequenza di Hubble, suddivide le galassie regolari in tre categorie: ellittiche, spirali e lenticolari in base al loro aspetto visuale (originariamente su lastre fotografiche). Una quarta categoria è dedicata alle galassie irregolari.

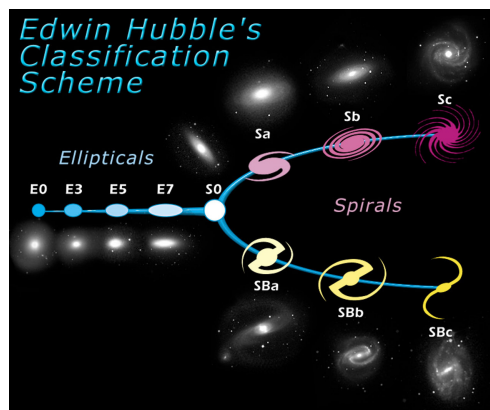


Figura 1.1: Schema della sequenza di Hubble

LE GALASSIE ELLITTICHE, presentano l'aspetto di un disco piú o meno schiacciato, con una distribuzione della luce uniforme. La loro può essere una simmetria quasi sferica (E0) o presentare l'aspetto lenticolare di un' ellisse (E1-E7). La cifra che segue la lettera E, rappresenta l'indice $n=10[1-(b/a)]$, dove b ed a sono rispettivamente il semiasse minore e maggiore dell'ellisse. Nella sequenza di Hubble l'ellitticità cresce da sinistra verso destra. Le galassie ellittiche hanno una percentuale di gas e polveri molto bassa e tipicamente sono galassie "anziane" in cui la maggior parte delle stelle sono vecchie, rossastre e di piccola massa. La maggioranza delle galassie ellittiche hanno dimensioni molto inferiori rispetto alla Via Lattea e prendono il nome di galassie ellittiche nane, con un diametro medio dell'ordine di 200 parsec. Piú rare sono le galassie ellittiche giganti, con diametri paragonabili alla nostra galassia. Quelle nane sono le piú abbondanti ma proprio per le loro scarse dimensioni a volte sfuggono alle nostre osservazioni. Le galassie ellittiche rappresentano un esempio di struttura trasparente, ovvero che conservano tutta la luce emessa (da qualsiasi direzione). Questo é la prova del fatto che, pur essendoci tante stelle, sono molto distanti tra di loro.

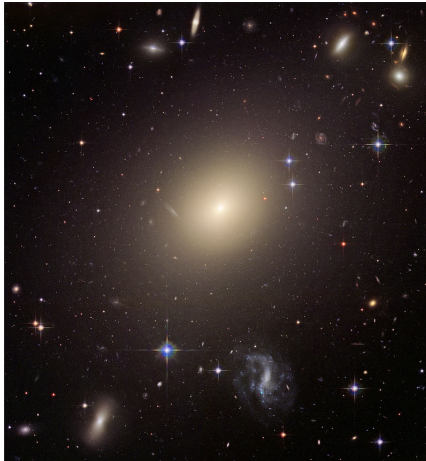


Figura 1.2: Immagine HST della galassia ellittica ESO 325-G004

LE GALASSIE A SPIRALE, hanno una struttura differenziata del piano del disco in cui é evidente la forma dei bracci di spirale. Nella sequenza di Hubble, le spirali regolari occupano la parte superiore e sono indicate con la lettera S, mentre le spirali barrate occupano la parte inferiore e sono indicate con le lettere SB. Le prime hanno la caratteristica di avere un bulge tipicamente a nocciolo, mentre nelle seconde si presenta allungato e attraversato da una barra. Entrambi i tipi sono a loro volta suddivisi in base alla struttura dei bracci (vedi Figura 1.1):

- Sa/SBa, hanno un nucleo molto esteso e luminoso, mentre i bracci sono molto stretti attorno ad esso;
- Sb/SBb, hanno il nucleo piú debole e i bracci meno estesi della categoria precedente (sia la Via Lattea che Andromeda sono di tipo Sb);
- Sc/SBc, hanno un nucleo piccolo e molto debole e i bracci formano una spirale molto ampia che ci permettono di vedere molto bene ammassi di stelle e nebulose.

Da questo ne ricaviamo che man mano che ci si sposta verso destra nella sequenza di Hubble, il bulge e i bracci delle galassie perdono di importanza, mentre iniziano a predominare il gas, le stelle giovani e le regioni HII.



Figura 1.3: Galassia a spirale barrata NGC1300 fotografata dal HST



Figura 1.4: Galassia a spirale NGC1187 fotografata dal VLT

LE GALASSIE LENTICOLARI, si trovano, nella sequenza di Hubble, nel punto di incontro tra le ellittiche e le spirali e sono denominate con la sigla S0. Le galassie lenticolari hanno caratteristiche intermedie tra le altre due classi: hanno un nucleo luminoso e una struttura a disco, non hanno i bracci di spirali ma presentano bande oscure di materia assorbente. Hanno poca materia interstellare e un rate molto basso di formazione stellare, perciò sono costituite perlopiú da stelle “vecchie”. Nella maggior parte dei casi la polvere interstellare si trova solo attorno al bulge e siccome non hanno bracci definiti, se viste di taglio, possono essere confuse con delle galassie ellittiche. Anche le galassie lenticolari sono soggette ad una suddivisione in sottospecie. Questa classificazione prende il nome dall’astronomo francese De Vaucouleurs e divide le galassie lenticolari in barrate, con anello interno e con forma a S.

Quelle barrate sono di tre tipi:

- SA0, non presentano il nucleo barrato;
- SB0, presentano una barra centrale netta;
- SAB0, presentano una barra debole (classe intermedia).

Le altre due categorie si basano sul fatto che la galassia abbia una struttura ad anello interna (S0(r)) oppure la forma ad ‘S’ (S0(s)). Una struttura intermedia fra le due é indicata con la sigla S0(rs).



Figura 1.5: Galassia lenticolare Fuso della costellazione del Drago

Un'ultima categoria é rappresentata dalle galassie irregolari. Questi tipi di galassie si chiamano cosí perché non presentano una struttura ben definita o riconducibile ad un'altra categoria. Il perché puó essere rapportabile a molti fenomeni, ma il motivo principale é che le galassie irregolari hanno una elevata attivitá di formazione stellare e quindi risultano facilmente plasmabili nella forma. La classificazione di Hubble ne riconosce due tipologie:

- Irr I, presentano poche strutture ma non abbastanza da classificarle
- Irr II, non presentano la benché minima struttura.



Figura 1.6: Galassia irregolare NGC1427

Potremmo anche menzionare le galassie nane (D), ovvero galassie con qualche miliardo di stelle. La Grande nube di Magellano é a volte classificata come galassia nana. Le galassie di questo genere sono poco luminose e di solito orbitano attorno a galassie piú grandi. Si differenziano in:

- Galassie nane ellittiche

- Galassie nane sferoidali
- Galassie nane irregolari

A questo proposito sono state scoperte anche galassie nane ultra-compacte, con 100-200 anni luce di diametro.

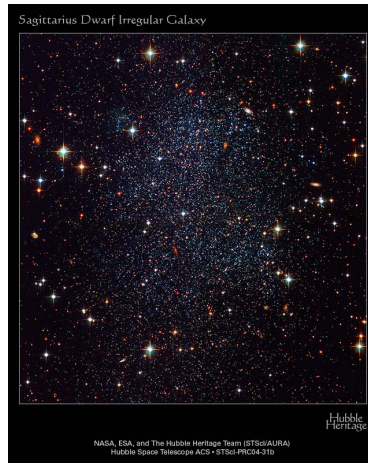


Figura 1.7: Galassia nana irregolare del Sagittario

Capitolo 2

Modifiche sulla sequenza di Hubble

In questo elaborato ho cercato di fare un excursus delle caratteristiche principali delle galassie, provando a mettere in luce l'importanza degli aspetti morfologici fotometrici e cinematici, al fine di avere una trattazione completa di questi oggetti cosmici. Hubble basó la sua classificazione su fotografie delle galassie prese con i telescopi del tempo. Pensava che le galassie ellittiche fossero una forma giovane, che si sarebbe poi evoluta in spirale. Le teorie moderne suggeriscono che la situazione sia piú o meno opposta e meno ben definita, ma questa credenza iniziale ha lasciato un segno nel gergo degli astronomi, che parlano di galassie dei primi tipi o degli ultimi tipi a seconda che si trovino sulla sinistra o sulla destra del diagramma. Quello che si puó dire un difetto di questa classificazione come della maggior parte di quelle utilizzate correntemente (ad esempio la classificazione di De Vaucouleurs) é dovuto alla soggettività del metodo. Non é definito nessun parametro oggettivo e questo porta spesso a divergenze di opinioni nel definire il tipo morfologico di una galassia. Oltretutto molto dipende da come sono state prese le immagini, in quanto una diversa banda di osservazione della galassia mette in evidenza strutture diverse. Questa classificazione (come altre coetanee) é basata su immagini prese in banda blu e riguarda solo galassie giganti o supergiganti delle quali era piú facile avere immagini dettagliate.

2.1 Classificazione di De Vaucouleurs

Nei primi anni sessanta, l'astronomo francese De Vaucouleurs, apportó alcune modifiche alla sequenza di Hubble per la classificazione delle galassie(già revisionata da Allan Sandage nel 1961). Queste modifiche furono atte a migliorare la classificazione, soprattutto delle galassie a spirale, prendendo il nome di classificazione di De Vaucouleurs. Da un lato, questa catalogazione riuscí a spiegare in modo molto piú preciso ed efficace le varie tipologie di galassie, ma dall'altro diventò fin troppo complicata, ecco perché, ancora oggi si preferisce usare la sequenza di Hubble. Le modifiche principali che caratterizzano la classificazione di De Vaucouleurs sono le seguenti:

- L'aggiunta di nuove classi, per esempio la classe Sd, successiva alla Sc, con una struttura a spirale piú caotica. Oppure la classe Sm, che ricorda come forme alla nube di Magellano. Infine la classe Im, cioè irregolare magellanica;

- L'introduzione di nuovi parametri osservativi per facilitare il riconoscimento della tipologia di galassia (alcuni già introdotti da Sandage). Sono i seguenti:
 - Il parametro r (ringed) e il parametro s (not ringed), il primo indica che i bracci di spirale si originano da un anello su cui termina la barra, il secondo indica che i bracci nascono al termine della barra. Il ring di cui si parla é presente anche nelle galassie a spirale normali. Perciò, con De Vaucouleurs, usiamo una denominazione particolare ovvero, $SA(r)a$, $SB(r)a$,... per le spirali con il ring, mentre per le spirali senza il ring avremo $SA(s)a$, $SB(s)a$,... Potrebbero capitare anche tipologie miste, che in base alla predominanza di un tipo rispetto all'altro si indentificano con le sigle rs o sr . Lo stesso vale per le dominanze di tipi A,B,AB . Quindi é molto semplice capire quanto sia particolareggiata, e quindi complicata, la classificazione di De Vaucouleurs.
 - Il parametro R anteposto alla sigla della classificazione sta a significare la presenza di un ring esterno al nucleo e ai bracci di spirale, per esempio $(R)S(r)a$ (spirale non barrata di tipo a con ring sia esterno che interno).
 - Il parametro R' , indica la presenza di un anello fittizio generato dai bracci nell'avvolgimento. In questo caso bisogna prestare attenzione, poiché non é sempre facile la distinzione tra anello vero e anello fittizio. Infatti bisogna tener conto la qualità del materiale osservato e bisogna considerare anche le proprietà intrinseche della galassia.
 - Il parametro m e il parametro f , ci informano sui bracci di spirale, in particolar modo uno ci dice che sono massicci(dovuti da un bulge piú prominente), l'altro che sono filamentosi.
- la creazione di tipologie intermedie a quelle introdotte da Hubble, tipo S_{cd} , S_d , S_{dm} , S_m , I_m e analoghi SB_{cd} , SB_d , SB_{dm} , SB_m , eccetera. Le S_{ab} , S_{bc} , SB_{ab} , SB_{bc} , furono già introdotte da Sandage. Le S_{dm} , S_m , I_m segnano la transizione da Spirali a Irregolari. De Vaucouleurs operó anche una codifica propria per la tipologia puramente barrata che denotó con SB , per la tipologia puramente normale che identificò con SA e per l'intermedia tra normale e barrata SAB . Quindi la S_a nella classificazione di Hubble diviene la SA_a in quella di De Vaucouleurs, come la S_b si traduce in S_{ab} e così via. De Vaucouleurs compì misure accurate che gli permisero di mostrare che le SA , SB e SAB si dividono equamente in 1/3 ognuna.

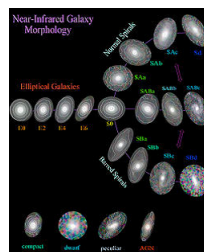


Figura 2.1: Sequenza di De Vaucouleurs limitata

Capitolo 3

Abbondanze relative delle tipologie di galassie nell'universo

Le abbondanze dei vari tipi di galassie nell'universo locale (e per galassie mediamente luminose) sono:

- 68% spirali
- 29% ellittiche/S0
- <3% irregolari

Ma queste abbondanze dipendono oltre che dalla luminosità della singola galassia, anche dall'ambiente in cui si trovano, infatti in regioni molto dense (in termini di galassie, come al centro degli ammassi) si arriva a:

- 10% spirali
- 90% ellittiche/S0
- < 1% irregolari

Questo suggerisce il legame tra spirali e ellittiche. Quando ci sono molte galassie per unità di volume, diminuisce la distanza media tra galassie e pertanto possono diventare significative le interazioni gravitazionali tra le galassie stesse. Si può pertanto avere frequentemente il fenomeno detto "merging", ovvero la fusione tra due galassie a seguito della reciproca interazione gravitazionale. A riguardo dell'ambiente in cui si trovano le galassie, possiamo affermare che, le galassie E e S0 si trovano soprattutto nelle regioni centrali degli ammassi di galassie o lungo le dorsali dei superammassi. Su scala maggiore possiamo dire più in dettaglio che queste due classi si dispongono nella parte centrale dei filamenti (le ellittiche popolano le regioni dense). Le galassie a spirale invece, le troviamo ammassate in Gruppi (con meno galassie rispetto agli ammassi) e tendono a disporsi sui lati dei filamenti. La Via Lattea per esempio, fa parte del cosiddetto Gruppo Locale, formato da più di 70 galassie.

Capitolo 4

Caratteristiche fotometriche e cinematiche

Fino ad ora abbiamo parlato solo delle caratteristiche morfologiche delle galassie, ma al fine di comprendere a fondo la fisica delle galassie é necessario considerare anche gli aspetti fotometrici e cinematici. Queste due caratteristiche risultano complementari l'una all'altra e insieme alla morfologia, ci danno un quadro completo per descrivere, classificare e comprendere le galassie. In particolar modo, ci occuperemo dei profili di brillantezza per quanto riguarda le caratteristiche fotometriche e delle curve di rotazione per gli aspetti cinematici. In questa trattazione prenderó in considerazione solo le galassie ellittiche e a spirale.

4.1 Profili di brillantezza

4.1.1 Galassie ellittiche

In generale, la luce emessa da una galassia é da considerarsi come la media delle luminosità (spettri) delle singole stelle, dove possiamo distinguere il continuo, le righe di assorbimento e le righe di emissione. Per quanto riguarda la brillantezza superficiale delle galassie ellittiche, ovvero la quantità di luce emessa per unità di superficie, sappiamo che diminuisce regolarmente dal centro verso i bordi. Vista la regolarità dell'andamento, é stata studiata una funzione che ne descrivesse il comportamento. Quindi se abbiamo una galassia ellittica di raggio R con un'intensità della luce emessa $I(R)$, fino ad un certo raggio abbiamo:

$$L_p(R) = 2\pi \int_0^R I(R)RdR \quad (4.1)$$

Per le galassie osservate, possiamo misurare sia la luminosità nel punto centrale I_0 , sia la luminosità totale L_t e, tracciando le isofote (congiungimenti di punti nella galassia con la stessa brillantezza), possiamo ricavare il raggio effettivo R_e cioè il raggio contenente metà della luminosità totale. Perciò si ha

$$L_p(R_e) = L_t/2 \quad (4.2)$$

Le quantità I_0 , L_t , R_e sono indipendenti da ogni fit di dati. Nel 1948 De Vaucouleurs formuló una legge empirica, nota come legge $R \frac{1}{4}$, per le galassie ellittiche e i bulges delle spirali

$$I(R) = I_0 e^{-7.67(R/R_e)^{1/4}}$$

Potremmo ricavare un grafico logaritmico dove tutte le galassie ellittiche giacciono sulla stessa curva adimensionale e per fare ciò, dobbiamo portare a primo membro $I(R)/I_0$, nel secondo $x = R/R_e$ e porre il differenziale $dR = R_e dx$. Ecco che tutte le galassie di questo tipo seguono perfettamente questo modello.

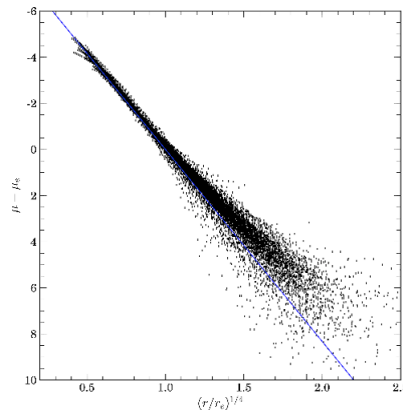


Figura 4.1: Piano logaritmico semplificato di questo tipo

Dove μ é $\log I(r)$ e μ_e é I_0 . La scia nell'immagine rappresenta un fit di 311 galassie ellittiche. La retta blu che si nota rappresenta il profilo di De Vaucouleurs ed é evidente come sia accurato per piccoli raggi, ma la maggior parte delle ellittiche devia a grandi raggi. Esiste anche un altro profilo empirico per la brillantezza ed é quello di Hubble, in questa forma:

$$I(R) = \frac{I_0}{1 + R/R_H^2} \quad (4.3)$$

dove R_H é un parametro di fit. Il caso generale é descritto dalla legge di Sersic, ovvero:

$$I(R) = I_0 e^{-bR/R_e^{1/n}}$$

con $n(> 0)$ e b da determinare. Bisogna innanzitutto calcolare L_t :

$$L_t = 2\pi \int_0^{(\infty)} I(R) R dR = 2\pi I_0 \int_0^{(\infty)} R e^{-bR/R_e^{1/n}} dR = 2\pi I_0 R_e^2 \int_0^{(\infty)} \frac{R}{R_e^2} e^{-b(R/R_e)^{1/n}} dR$$

ponendo $x = \frac{R}{R_e}$ e $dx = \frac{dR}{R_e}$, dopo alcune sostituzioni otteniamo:

$$L_t = 2\pi I_0 R_e^2 \frac{n}{b^{2n}} \int_0^{(\infty)} t^{2n-1} e^{-t} dt$$

qui vediamo come l'integrale coincide con la funzione gamma (Γ) di eulero completa (con $Z = 2n$) e sfruttando una nota proprietà, otteniamo la luminosità secondo Sersic

$$L_t = 2\pi I_0 R_e^2 \frac{\Gamma(2n + 1)}{b^{2n}}$$

ora dobbiamo calcolare la luminosità fino ad un certo raggio perciò riprendiamo la relazione per L_p e dopo opportuni cambiamenti di variabile e degli estremi di integrazione abbiamo

$$L_p(R) = 2\pi I_0 R_e^2 \frac{n}{b^n} \int_0^{b(R/R_e)^{1/n}} t^{2n-1} e^{-t} dt$$

dove l'ultimo integrale è la funzione gamma incompleta ad x di eulero (γ), perciò

$$L_p = 2\pi I_0 R_e^2 \frac{n}{b^{2n}} \gamma\left(2n, b \frac{R^{1/n}}{R_e}\right)$$

ora imponiamo $L_p(R_e) = \frac{L_t}{2}$ e si ha:

$$\frac{1}{2} \pi I_0 R_e^2 \frac{2n \Gamma(2n)}{b^{2n}} = 2\pi I_0 R_e^2 \frac{n \gamma(2n, b)}{b^{2n}}$$

per avere:

$$\gamma(2n, b) = \frac{\Gamma(2n)}{2}$$

Da questo risultato ricaviamo una serie asintotica

$$b(n) = 2n - \frac{1}{3} + \frac{4}{405n} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)$$

La figura sopra mostra i profili di Sersic da $n = 1$ a $n = 10$, dove possiamo vedere come le galassie ellittiche più luminose hanno n grandi (5 – 6) mentre quelle meno luminose hanno n piccoli (3). Se volessimo ricondurci al profilo di De Vaucouleurs basta porre $n = 4$ ottenendo $b = 7.67$.

4.1.2 Galassie a spirale

Per analizzare il profilo di brillantezza delle galassie a spirale bisogna considerare il bulge e il disco come entità separate. Il bulge ha una trattazione simile a quella delle galassie ellittiche, mentre il disco viene analizzato con la legge esponenziale di Freeman, ovvero con un profilo di brillantezza ad $n = 1$ (non sono tuttavia profili Sersic 1). La legge esponenziale è la seguente

$$I(R) = I_0 e^{-R/R_d}$$

Dove R_d è il raggio di scala (parametro di fit) che prende valori tra 2 e 10 Kpc per le tipologie tra S0 e Sbc, mentre è < 5 Kpc per i tipi morfologici avanzati. In questo caso abbiamo un parametro libero che denota la maggiore complessità delle spirali rispetto

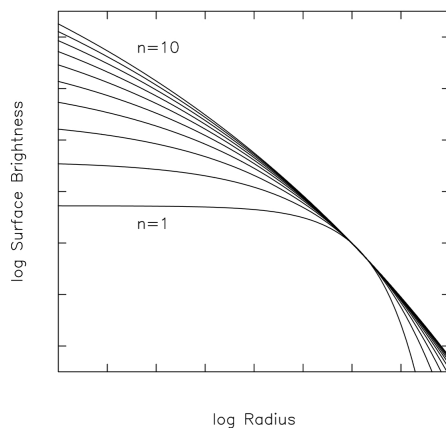


Figura 4.2: Profili di Sersic

alle ellittiche. Per le spirali osservate face on, potrebbero presentarsi delle irregolarità nei profili dovute all'intensa attività di formazione stellare. Per evitare ciò, basta prendere in considerazione solo le zone più vecchie del disco. Guardando le spirali edge on invece, riusciamo a distinguere benissimo il disco dal bulge ma potrebbero esserci grandi difficoltà di risoluzione. Non tutti i dischi seguono la legge esponenziale e nel 1981, Boroson, campionò 26 galassie e vide che solo il 35% seguivano la legge esponenziale (38% non la seguivano, 27% indeterminate).

4.2 Curve di rotazione

4.2.1 Galassie ellittiche

Per ogni galassia possiamo misurare vari parametri strutturali come: luminosità totale, luminosità del disco e del bulge, raggio scale del bulge e del disco, raggio efficace, redshift... Le prime misure delle curve di rotazione delle galassie ellittiche, ci diedero modo di constatare che l'appiattimento della curva era dovuto a moti caotici delle stelle, e non alla rotazione. Infatti nelle ellittiche, le stelle seguono un andamento irregolare, a differenza delle spirali. Per ottenere la dispersione di velocità bisogna misurare l'allargamento delle righe, quindi risulta che se misuriamo un allargamento grande vuol dire che i moti delle stelle sono grandi. La dispersione delle velocità ottenuta è molto più grande della velocità di rotazione.

4.2.2 Galassie a spirale

Per le galassie a spirale, visto che c'è rotazione del disco si può parlare di curva di rotazione $V(r)$ e nonostante siano oggetti più complicati, il discorso è molto più semplice.

Ad esempio, i bracci di spirale, inizialmente, si pensava fossero strutture distinte, ma con il Winding problem ciò fu mentito. Infatti secondo questa teoria, i bracci, a causa delle rotazioni continue, dovrebbero essere completamente avvolti attorno al bulge. In realtà altro non sono che onde di densità, cioè onde che perturbano lo spazio circostante al loro passaggio. Ora cerchiamo in primo luogo di spiegare cosa è una curva di rotazione. La curva di rotazione di una galassia è la rappresentazione della velocità radiale $V(R)$ in funzione appunto della distanza radiale R di un corpo. Dobbiamo però distinguere tre regioni: il bulge, il disco e la parte esterna al disco.

- Nel bulge, abbiamo una distribuzione sferica della massa che diminuisce radialmente. Perciò nella formula dell'accelerazione di gravità dobbiamo inserire l'integrale per la massa

$$a_g = \frac{GM}{R^2} \int_0^R 4\pi r^2 \rho(r) dr = \frac{v^2(R)}{R}$$

e notiamo come la velocità radiale cresce con R .

- Nel disco invece la velocità radiale è indipendente da R quindi è proporzionale a R^0
- Nella parte esterna al disco invece, la velocità radiale decresce esponenzialmente e quindi otteniamo una curva kepleriana che va come $\frac{1}{R^{1/2}}$ (andamento iperbolico).

In realtà, l'andamento teorizzato ora, non coincide affatto con quello osservato. O meglio, non si è mai riusciti ad osservare il braccio kepleriano, ma la velocità radiale rimane pressoché costante. Significa che, la massa, nonostante ci siano poche stelle e gas, continua a crescere. La spiegazione sta nella materia oscura. Infatti questa, non emette e non assorbe ma contribuisce solo alla gravità (nell'universo ricopre il 20%) e così fa rimanere alto il presunto braccio kepleriano. Ecco come si differenziano la curva reale con quella ipotizzata.

Diciamo che è molto interessante studiare la curva di rotazione del disco poiché contiene idrogeno neutro che è fondamentale per la mappatura del disco galattico. Ecco perché si studia la riga a 21 cm di emissione dell'idrogeno (banda radio) oppure la riga di emissione $H\alpha$ a 6563Å (ottico)

La curva di rotazione delle galassie

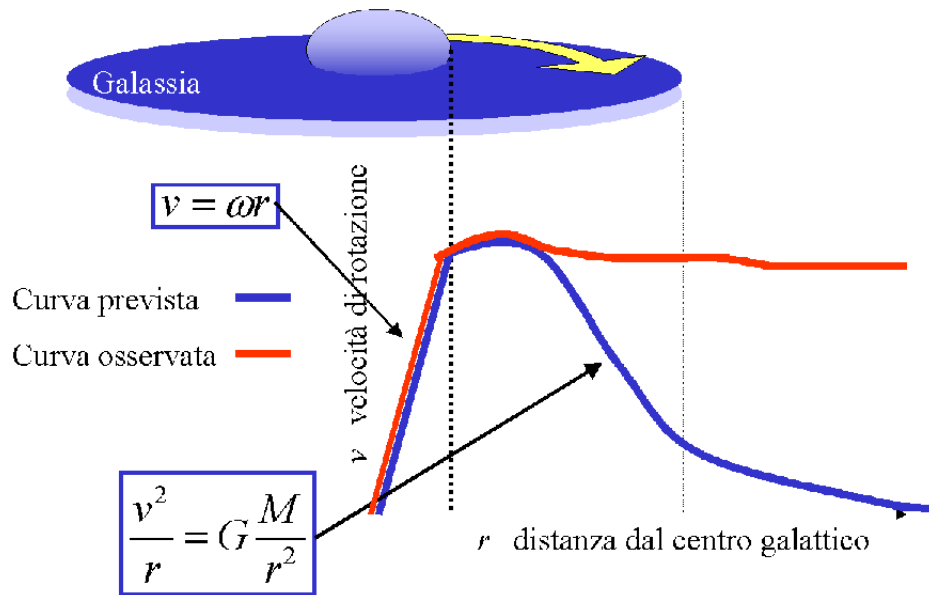


Figura 4.3: Curva di rotazione del galassie.



Figura 4.4: Immagine nell'ottico e immagine nel radio di una galassia a spirale

Bibliografia

- [1] Elementi di Astronomia, Pietro Giannone, Pitagora Editrice Bologna.
- [2] Appunti del corso di Astrofisica Extragalattica, Professor Ciotti Luca, Corso di Laurea in Astronomia
- [3] Appunti del corso di Processi di radiazione, Professor Daniele Dallacasa, Corso di laurea in Astronomia
- [4] Processi radiativi (continuo) e MHD, Carla e Roberto Fanti