

## Classificazione delle Galassie

caratteristiche morfologiche, fotometriche e cinematiche

Candidato:  
**Andrea Cabras**

Relatore:  
**prof.ssa Marcella Brusa**

## Introduzione

L'universo nel quale viviamo è una struttura immensamente estesa composta da centinaia di miliardi di galassie ognuna delle quali contiene al suo interno un numero di stelle dell'ordine del centinaio di miliardi. Le galassie sono delle strutture stabili auto gravitanti dette anche "virializzate", cioè in uno stato di equilibrio e di non collisionalità. Sono organizzate e formate principalmente da Stelle, Gas e Polveri e situate all'interno di raggruppamenti di ammassi di Galassie detti "*Galaxy Clusters*". Per comprendere come è strutturata una galassia bisogna operare un'analisi sugli elementi che la compongono, come essi si muovono al loro interno e quali ne sono le caratteristiche che le distinguono l'una dall'altra. Possiamo individuare tipologie differenti di galassie in base alla loro morfologia: Ellittiche, Spirali, Lenticolari ed Irregolari. Lo studio delle galassie, così come per l'universo, è un processo molto complesso che richiede all'astronomo una grande capacità interpretativa in quanto gli oggetti da studiare sono molto distanti da lui e dagli strumenti che utilizza per le misurazioni. Nondimeno, la fantasia ad inventare ed evolvere strumenti che siano appunto capaci di effettuare esperimenti dove il laboratorio è il cielo aperto. I contributi degli studi scientifici tra il 1800 ed il 1900 delinearono il punto di partenza per una teoria e conoscenza dello spazio più profonda, sino alla ancora più moderna radio-astronomia dove, dallo spettro di emissione di un oggetto (abbreviato alla sigla **SED**, ovvero "Distribution Energy Spectral"), è possibile definire la composizione chimica di una galassia, quali processi fisici ne rendono una struttura stabile, investigare dettagliatamente sul comportamento e la fenomenologia al suo interno, sino alla scoperta delle radiosorgenti. Con questo elaborato si vuole cercare di suggerire un percorso logico da intraprendere per identificare una galassia nell'universo, saperla riconoscere e distinguere per le sue caratteristiche, individuare i processi interni che ne possono dare un profilo più specifico ed una più approfondita catalogazione, schematizzare i modelli matematici che le descrivono sia da un punto di vista strutturale che astro-fisico per capire quindi i processi evolutivi dei sistemi galattici. Verranno trattati principalmente i modelli di galassie a spirale ed ellittiche riguardo alle loro caratteristiche morfologiche, fotometriche e cinematiche.

# Capitolo 1

## Classificazione morfologica delle Galassie

### 1.1 Classificazione di Hubble

Le galassie vengono catalogate per la prima volta dal punto di vista morfologico ed evolutivo con la classificazione di Hubble nel 1926. Questa classificazione distingue principalmente due tipologie di galassie: le **Early Type** e **Late Type**. Alla prima categoria appartengono galassie dette ellittiche ed altre lenticolari mentre alla seconda le galassie dette spirali e le irregolari. Lo schema di Hubble, mostrato in figura 1.1, classifica le galassie ellittiche in base alla loro ellitticità, da quasi nulla E0 sino alle E7, schematizzate in figura 1.2 e le spirali in figura 1.3. Si nota una tipologia di Galassia definita come S0 o lenticolare, ovvero galassie nelle quali è presente un nucleo centrale ma prive di bracci come accade invece nelle Sa, Sb, Sc o SBa, SBb o SBc. Per non confondere ad esempio le spirali S0 con delle ellittiche bisognerà quindi approfondire le loro analisi su caratteristiche non morfologiche. Nello schema di Hubble inoltre si suppone un processo evolutivo da sinistra verso destra, ovvero come che le S siano una evoluzione delle E mentre pare potrebbe essere invece un percorso evolutivo al contrario: si vedrà infatti che le spirali possiedono un maggior numero di stelle giovani mentre le ellittiche principalmente solo stelle di età avanzata.

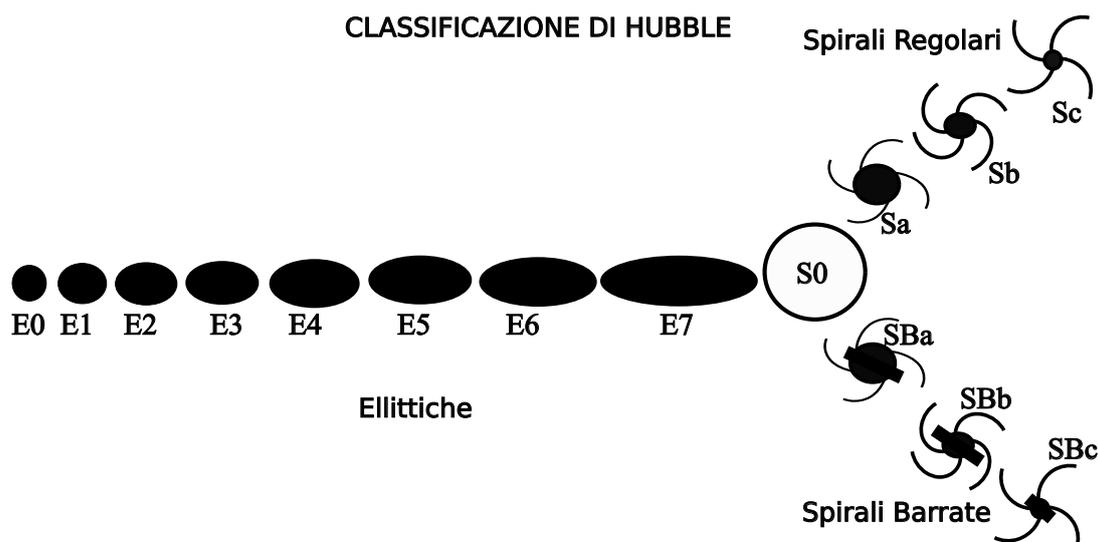


Figura 1.1: Lo schema di Hubble con a sinistra i profili di galassie ellittiche seguito a destra da quello di galassie a Spirale regolari in alto e barrate in basso [1].

## 1.2 Galassie Ellittiche

Queste galassie vengono chiamate anche ETG o Sferoidi in quanto possono assumere la conformazione ellissoidale *oblata*, *prolata* o *triassiale*, ovvero possono risultare alla vista più o meno schiacciate.

Possono avere dimensioni tra 1 e 200 Kpc<sup>1</sup> e con masse dell'ordine di  $10^5 - 10^{13} M_{\odot}$ <sup>2</sup>. All'interno vi si trovano stelle vecchie di popolazione II [2] che ne definiscono un colore rossastro. Le temperature si aggirano attorno ai  $10^6 - 10^7 K$ .

Per la loro nomenclatura si indica una lettera E seguita da un numero intero che ne distingue il loro parametro di schiacciamento  $p_s$ :

$$p_s = \left[1 - \frac{b}{a}\right] \times 10$$

Dove a e b sono rispettivamente i semiassi maggiore e minore dell'ellisse. Una caratteri-

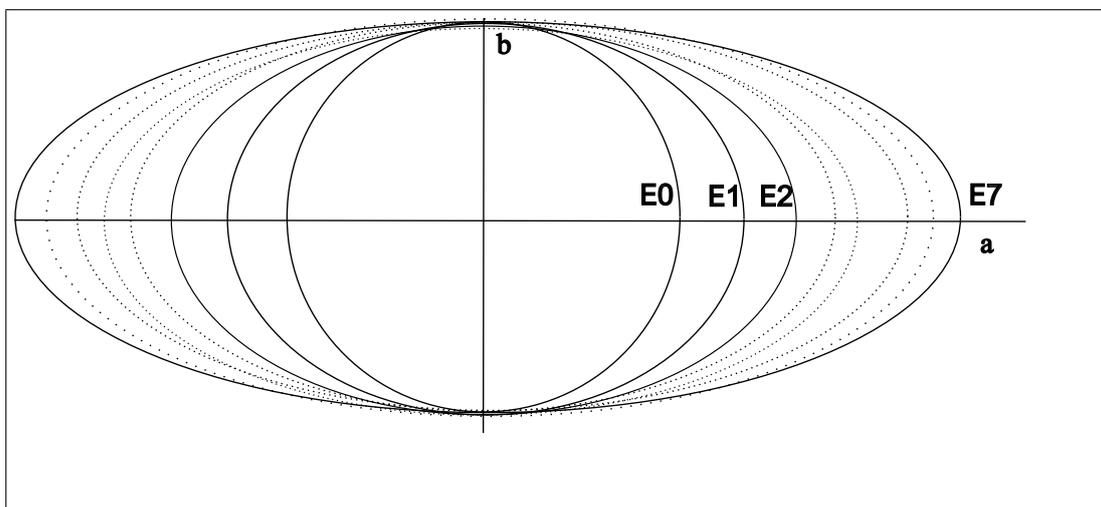


Figura 1.2: Profili di Galassie Ellittiche rispetto a gli assi dell'ellissoide con asse minore b costante: E0, il profilo più interno, ha un parametro di schiacciamento nullo (profilo circolare), più il rapporto tra gli assi  $\frac{b}{a}$  decresce e più lo schiacciamento e quindi  $p_s$  sarà accentuato [3].

stica fondamentale di queste galassie è che non esistono, per motivi di instabilità, valori di  $p_s > 7$  mettendo quindi un limite allo schiacciamento dell'ellissoide galattico "**Firehose Instability**" [4]: l'instabilità fa sì che la galassia si deformi o si pieghi in una direzione perpendicolare rispetto al suo asse più lungo. Dopo che l'instabilità ha fatto il suo corso, la galassia è meno allungata (cioè più rotonda) di prima. Qualsiasi sistema stellare sufficientemente sottile, in cui alcune componenti della velocità interna sono sotto forma di movimenti casuali o controcorrente (in opposizione alla rotazione), è soggetto all'instabilità. Quindi è possibile asserire che l'organizzazione strutturale ed il comportamento delle stelle all'interno della galassia determinano poi la sua forma. Al loro interno vi si trovano popolazioni di stelle di tipo II in età avanzate che si muovono in modo casuale. La tipologia irregolare invece, già citata nell'introduzione, non ha strutture ben definite e non verrà trattata in questo lavoro, non avendo delle caratteristiche particolarmente rilevanti.

<sup>1</sup>Il parsec (pc) è una unità di misura astronomica relativa delle distanze e corrisponde a  $1pc \approx 3 \times 10^{13} Km$ .

<sup>2</sup>☉ con questo simbolo si indica il sole e rapporta le grandezze considerate in unità solari.

### 1.3 Galassie a Spirale

A questa tipologia di galassie appartiene anche la Via Lattea nella quale si trova la Terra e sono indicate con il prefisso S (spirali). Sono composte principalmente da un rigonfiamento centrale detto **Bulge**, con caratteristiche confrontabili con le galassie ellittiche stesse, ad alta temperatura e da un gas più freddo circostante, per la maggior parte *HII* distribuito radialmente e dalla forma circolare detto **Disco**. In quest'ultimo possiamo individuare tre regioni principali che complessivamente sono spesse 1 Kpc, una centrale detta **Thin Disk** che separa due **Thick Disk**.

Escluse le S0, questa tipologia è caratterizzata dalla presenza di bracci rotanti attorno al nucleo centrale con una popolazione stellare di tipo I principalmente OB<sup>3</sup> di giovane età, ricche di elementi pesanti necessari anche per la formazione di pianeti, dal colore blu ed una formazione stellare molto intensa. Ruotando attorno al bulge, i bracci possono essere considerati delle onde di densità [5, 6], ovvero delle vibrazioni che si propagano sul disco galattico le quali, al loro passaggio lasciano indietro una scia di stelle più vecchie. Questo tipo di Galassie sono infine immerse in un **Alone** più o meno tondo detto **Halo** costituente una popolazione di stelle di popolazione II ovvero stelle vecchie a bassa metallicità (**metal poor**), dal colore rossastro e formatesi quando la galassia era più giovane. Queste galassie sono schematizzate nella figura 1.3.

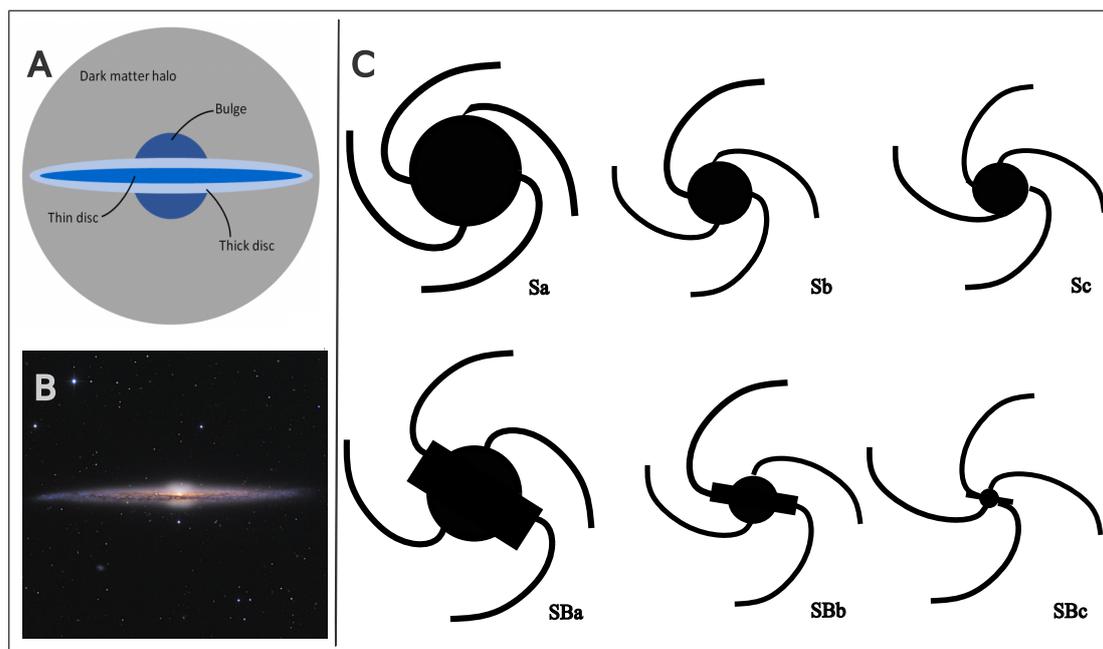


Figura 1.3: A: Struttura di galassie spirali; B: NGC 4565 (A e B immagini di Ken Crawford); C: galassie Regolari Sa, Sb, Sc in alto, e Spirali Barrate SBa, SBb, SBc in basso. Questa seconda tipologia presenta un bulge allungato (evidenziato dalla seconda lettera) rispetto alle regolari. Dalla Sa alla Sc il disco domina sempre di più rispetto il bulge per luminosità; l'avvolgimento dei bracci diminuisce dalla Sa alla Sc; nelle Sa i bracci sono poco definiti da una forma continua e regolare, mentre nelle Sc sono ben curvati e definiti (immagine C [7]).

<sup>3</sup>classificazione delle stelle dalle più calde alle meno calde :O = blu, B=azzurro, A=bianco, F=bianco giallo, G=giallo, K=arancione e M=rosso (vedi anche [2]).

## 1.4 Proiezioni

Uno concetto fondamentale per la comprensione dell'osservazione dello spazio è la definizione di proiezione di una immagine. Questa definizione sarà poi indispensabile per capire come associare una funzione di distribuzione di densità di massa di una galassia alla sua forma di proiezione. Per proiezione si intende il definirsi di una forma di un oggetto su uno schermo qualsiasi attraverso la propagazione di luce la quale, partendo da una sorgente luminosa, incontra nel suo percorso un oggetto interposto tra la sorgente e lo schermo, che la ostacolerà, facendo passare solo i fotoni che non lo incontrano e che non lo attraversano, o tutt'al più lo attraversano solo parzialmente, tanto da creare un cono d'ombra dall'oggetto allo schermo. Infatti quanto più un mezzo di propagazione è denso, tanto minore sarà la capacità di un'onda di propagarsi in esso, come ad esempio con la presenza di nubi nel cielo o i gas e polvere interstellari. Da ciò consegue anche la proprietà di trasparenza oppure opacità di un mezzo di propagare un segnale: questa proprietà viene detta **profondità ottica**. La galassia appare come un punto luminoso lontano e bisogna capire il motivo che spinge gli astronomi ad affermare che essa abbia la forma ad esempio ellissoidale o spirale. La proiezione di una galassia su uno schermo o l'oculare del telescopio, dipende dalla distanza in cui essa si trova, dalle sue dimensioni, dalla linea di vista o **asse ottico** [6] dell'osservatore e, soprattutto, dalla precisione dei nostri strumenti, escludendo la presenza di materia interposta. Le immagini si definiscono lungo una linea detta asse ottico che avrà direzione ortogonale rispetto al piano, detto **piano focale**, in cui esse si formano e che, nonostante gli oggetti siano tridimensionali, vengono immagazzinate in due dimensioni e saranno quindi interpretabili come delle proiezioni; sarà poi la distanza focale, ovvero la distanza che intercorre tra l'osservatore e la lente, a stabilire il punto in cui vedere l'immagine nitida. L'oggetto osservato, in realtà, non giace su un piano poiché è tridimensionale con una sua forma e profondità e risulterà quindi deformato in base alla **prospettiva**.

Questo piano di proiezione definisce in maniera univoca la prospettiva di vista. Per analogia, se si pensa ai luoghi geometrici definiti come **coniche**, è possibile farsi un'idea di cosa vuol dire osservare la proiezione di una galassia.

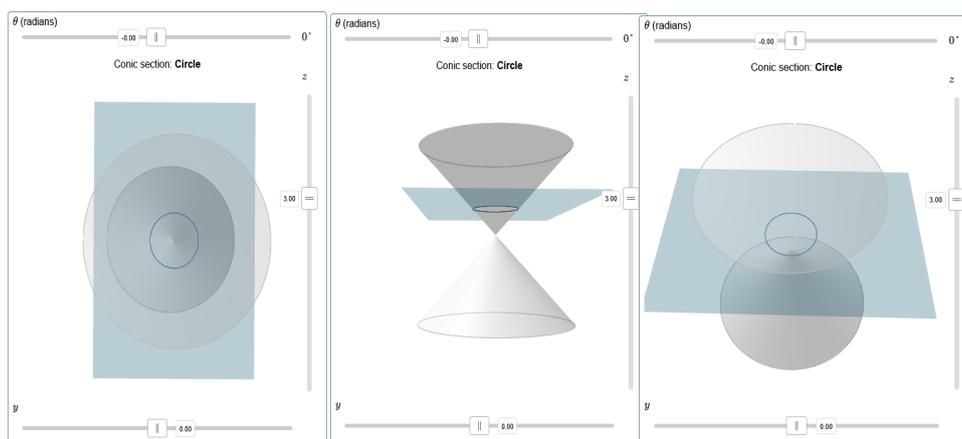


Figura 1.4: esempio di coniche circolari: frontale, laterale, obliquo [8].

Le coniche [9], geometricamente, sono un insieme definito dall'intersezione di un piano con un cono tridimensionale (figure 1.4, 1.5, 1.6), sono delle figure bidimensionali giacenti sul piano intersecante e delimitate dalle direttrici del cono; queste figure possono essere

descritte attraverso equazioni, dette quadratiche, e proprietà matematiche ed in base alla loro forma posso essere classificate: l'intersezione di queste due figure infatti darà come risultato diverse curve in base proprio alla direzione dell'asse ottico, alla distanza del piano e all'inclinazione di esso. Possiamo distinguervi due classi : **degeneri e non degeneri**. Tra i vari luoghi geometrici è possibile ottenere un cerchio, un'ellisse, una parabola, una iperbole o una retta o un punto in base a quanto è inclinato di un certo angolo  $\alpha$  il piano intersecante rispetto alle direttrici del cono e, anche, in base alla distanza che il piano ha rispetto al vertice del cono. Nel dettaglio ci si limita solo al caso di ellisse e del cerchio, ovvero due coniche pressoché equivalenti e dette non degeneri, poiché l'intersezione non avviene nel vertice del cono (motivo per il quale sarebbero degeneri).

Questo è importante poiché verrà assunto proprio il vertice del cono come il punto in cui si troverà l'osservatore, fatto che ne stabilisce quindi la distanza e l'inclinazione del piano perpendicolare focale escludendo quindi coniche degeneri.

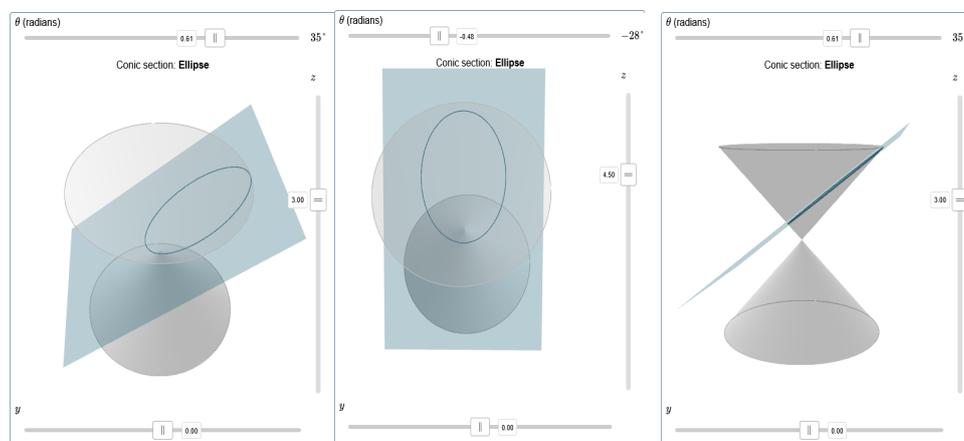


Figura 1.5: esempio di coniche ellissoidali: obliquo, frontale, laterale [8].

Se  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  si vedrà un'immagine non deformata (**front face**), mentre se  $0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}$  la proiezione della conica risulterà deformata accentuando l'ellitticità. Lo stesso piano in cui giace la conica può essere definito come **piano proiettivo**. Effettuando poi delle rotazioni successive rispetto alla conica ottenuta, è possibile osservare un oggetto dalla forma diversa che preserverà sempre i rapporti assiali dell'immagine osservata in partenza risultando alle volte gonfiata o schiacciata. Ecco quindi che, posto un oggetto ad una distanza corrispondente all'intersezione delle due figure iniziali con inclinazione  $\alpha$ , e posto l'osservatore nel vertice del cono, si può interpretare come **Proiezione** la conica stessa che rappresenterà quindi l'immagine dell'oggetto osservato che in questo caso è una galassia.

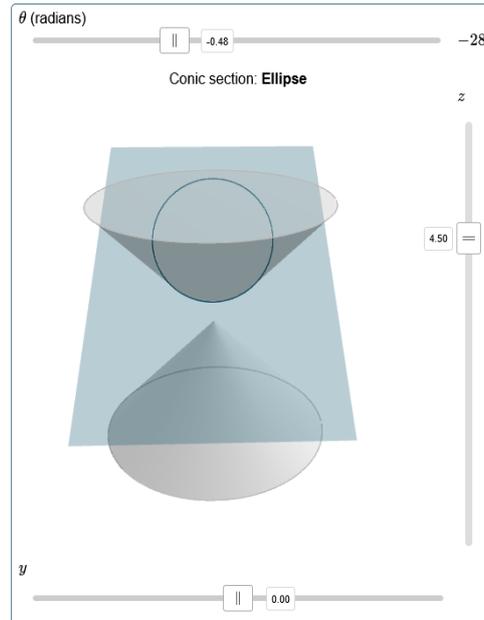


Figura 1.6: esempio di deformazione della conica: l'inclinazione dell'angolo  $\alpha$  del piano in cui giace l'ellisse fa sì che la conica sembri un cerchio, infatti il piano focale, corrispondente al piano proiettivo non è frontale [8].

Si ha ora un modello geometrico e matematico che può descrivere le proprietà e le caratteristiche di una galassia come ad esempio la forma, la dimensione, la massa e poi anche la luminosità. Identificando una densità  $\rho(\vec{x})$ , associata ad una galassia e distribuita con una geometria ellissoidale tridimensionale per un sistema cartesiano, si può studiare la sua distribuzione rispetto ad una proiezione e quindi ad una conica; è inoltre lecito effettuare una rotazione  $R$  la quale corrisponde in algebra lineare ad un cambiamento di base da  $(x_1, x_2, x_3) \rightarrow (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  per ottenere una densità  $\rho(x) = \rho(R\xi)$  dove  $\xi$  sarà quindi una combinazione lineare della terna  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ . Considerando ad esempio  $\xi_3$  come linea di vista dell'osservatore, possiamo ottenere una combinazione lineare della proiezione sul piano  $(\xi_1, \xi_2)$ .

La proiezione sarà dunque:

$$\Sigma(\xi_1, \xi_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(R\xi) d\xi_3$$

che corrisponde alla quantità di materia lungo  $\xi_3$ . Per ottenere la quantità di materia presente bisognerà quindi integrare il risultato ottenuto nel piano di proiezione  $(\xi_1, \xi_2)$ :

$$\Sigma(\xi_1, \xi_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(R\xi) d\xi_3 = \iiint_{-\infty}^{+\infty} \rho(R\xi) d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3$$

sostituendo

$$\begin{cases} d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 = d^3x \\ \rho(\vec{x}) = \rho(R\xi) \end{cases} \Rightarrow \int_{R^3} \rho(\vec{x}) d^3x = M_{tot}$$

la funzione  $\Sigma(R)$  è detta **densità di massa superficiale**

Combinando insieme le varie geometrie con le proiezioni delle distribuzioni di densità,

possiamo ricavare diversi profili di densità ognuno per ogni sistema considerato: Sistema a distribuzione di densità **Sferica o Sferica Uniforme**, sistema **Gaussiano**, a legge di **Potenza**, **Beta Model** e l'**Ellissoide Triassiale**. Quest'ultimo verrà qui di seguito analizzato nel dettaglio in quanto risulterà essere il modello più adeguato per descrivere le galassie ellittiche.

### Ellissoide Triassiale

Questa distribuzione di densità  $\rho(n)$ , in questo modello matematico, dipende dallo strato  $n$  considerato e ne definisce una forma a strati detta di "Cipolla Ellissoidale"  $n^2$ , ottenuta dalla matrice  $I$  e la terna  $\vec{x} = (x, y, z)$ . Questa è la rappresentazione matematica e geometrica tipica di una galassia ellittica. Matematicamente si applica  $I$  al prodotto scalare :

$$I = \begin{pmatrix} \frac{1}{a^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{b^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c^2} \end{pmatrix} \quad \Rightarrow n^2 = \langle I\vec{x}, \vec{x} \rangle = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}$$

La matrice  $I$ , che definisce i semiassi dell'ellissoide, è diagonale con  $\det(I) > 0$  ovvero non singolare ed invertibile, la sotto matrice  $I_0$  quadrata di coefficienti  $[a_{22}, a_{23}, a_{32}, a_{33}]$  ha il  $\det(I_0) > 0$  implica che la proiezione e quindi la conica è un'ellisse o al massimo un cerchio e, infine, considerando la matrice  $R$  di cambiamento di base come la rotazione vista in precedenza è possibile scrivere :

$$n^2 = \langle I\vec{x}, \vec{x} \rangle = \langle IR\vec{\xi}, R\vec{\xi} \rangle = \langle R^T IR\vec{\xi}, R^T R\vec{\xi} \rangle = \langle R^T IR\vec{\xi}, \vec{\xi} \rangle = \langle H\vec{\xi}, \vec{\xi} \rangle ; \\ H = R^T IR$$

Considerando poi un vettore generico  $\vec{\xi} = \xi_{\perp} \hat{e}_{\perp} + \hat{e}_3 \xi_3$ , la bilinearità del prodotto scalare e la linearità di  $H$  si ottiene il seguente risultato:

$$n^2 = \langle H(\vec{\xi}), \vec{\xi} \rangle = \langle H(\xi_{\perp} \hat{e}_{\perp} + \hat{e}_3 \xi_3), \xi_{\perp} \hat{e}_{\perp} + \hat{e}_3 \xi_3 \rangle$$

$$n^2 = \xi_3^2 \underbrace{\langle H(\hat{e}_3), \hat{e}_3 \rangle}_A + 2\xi_3 \underbrace{\langle H(\hat{e}_3), \xi_{\perp} \rangle}_B + \underbrace{\langle H(\xi_{\perp}), \xi_{\perp} \rangle}_C = A\xi_3^2 + 2B\xi_3 + C$$

Si è quindi calcolato il valore di  $n^2$  necessario per ricavare la proiezione ortogonale.

$$\Sigma(\xi_{\perp}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\sqrt{\langle H(\vec{\xi}), \vec{\xi} \rangle}) d\xi_3 = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\sqrt{n^2}) d\xi_3 = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\sqrt{A\xi_3^2 + 2B\xi_3 + C}) d\xi_3$$

$$\begin{cases} t = \sqrt{A}\xi_3^2 + \frac{B}{\sqrt{A}} \\ d\xi_3 = \frac{dt}{\sqrt{A}} \end{cases} \quad \Rightarrow \Sigma(\xi_{\perp}) = \frac{1}{A} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho \left( \sqrt{t^2 + C - \frac{B^2}{A^2}} \right) dt$$

Questo risultato è un importante strumento utile per distinguere una galassia ellittica da una spirale ad esempio S0 : la proiezione infatti dipende dal piano in cui essa stessa giace e, data una distribuzione di densità per un ellissoide triassiale, si potrà riscontrare il fenomeno detto **Isophotal Twisting** [4] tale per cui, in un sistema trasparente di ellissoide triassiale (come le galassie ellittiche), si hanno curve **Isodense**, a densità costante, con la forma di ellissi così come per le sue curve **Isofote**, curve con la stessa luminosità superficiale, confermando quindi la geometria ellissoidale della galassia. Questo argomento porta a considerare l'Ellissoide Triassiale come il miglior candidato a descrivere le galassie ellittiche.

Facendo inoltre un ragionamento inverso è possibile stabilire la massa di una galassia partendo dalla sua luminosità e sfruttando la costanza del rapporto  $\frac{M_{Gal}}{L}$ .

$$\Sigma(R) = \frac{M_{Gal}}{L} I(R)$$

Entra ora in gioco un'altra grandezza detta brillantezza  $I(R)$ , utile per ricavare la luminosità di una galassia con la quale sarà anche possibile effettuare la de-proiezione e ricavare in senso inverso la massa totale.

## Capitolo 2

# Caratteristiche fotometriche delle galassie

Una volta che si è individuato il profilo di densità dell'oggetto che si osserva e quindi la sua proiezione, si può definire un altro fattore identificativo: la luminosità totale. La luminosità totale  $L_T$  [4] di una galassia viene definita dall'equazione:

$$L_T = 2\pi \int_0^R I(R) R dR$$

A questo proposito si possono distinguere due principali profili di Brillanza  $I(R)$ , uno per galassie ellittiche ed uno per le galassie a spirale. Per brillanza si intende il rapporto tra il flusso di energia emessa da una sorgente luminosa e la superficie nel quale viene emessa.

### 2.1 Profili di Brillanza

Nel caso di galassie ellittiche, considerate come oggetti trasparenti rispetto alle galassie a spirale, la brillanza  $I(R)$  seguirà un andamento secondo la legge di **De Vaucouleurs** [4] o più rigorosamente la legge di **Sersic** [4], essendo quella di De Vaucouleurs un caso particolare della legge di Sersic. la legge di De Vaucouleurs per la Brillanza  $I(R)$  infatti è:

$$I(R) = I_0 e^{-7,67 \left(\frac{R}{R_e}\right)^{\frac{1}{4}}} \Rightarrow \log \left( \frac{I(R)}{I_0} \right) = -7,67 \left( \frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Questa è una legge empirica abbastanza corretta che può essere compresa analizzando il ragionamento dello stesso De Vaucouleurs che, partendo dalla brillanza centrale  $I_0$ , analizzò dei profili di brillanza ad essa concentrici sino ad un raggio  $R_e$  detto Raggio effettivo per il quale si avrà un valore della luminosità pari a metà di quella totale.

$$L_P(R_e) = \frac{L_T}{2}$$

Essendo questa legge empirica, per etichettare la brillanza associata ad una galassia ellittica si utilizza una legge molto simile a quest'ultima ma più generale detta Legge di **Sersic**:

$$I(R) = I_0 e^{-b \left(\frac{R}{R_e}\right)^{\frac{1}{n}}}$$

La differenza sostanziale di questa legge è la comparsa dei termini  $b$  ed  $n$  che possono essere ricavati sfruttando le relazioni tra  $L_p$  ed  $L_T$  e calcolarli ottenendo :

$$L_T = 2\pi \int_0^R I(R) R dR = \pi I_0 R_e^2 \frac{\Gamma(2n)}{b^{2n}} \left( \frac{1}{2} \right) = L_P(R_e) = 2\pi I_0 R_e^2 \frac{n}{b^{2n}} \gamma \left[ 2n, b \left( \frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$$

$$\Gamma(2n) \left(\frac{1}{2}\right) = \gamma [2n, b] \Rightarrow b(n) = 2n - \frac{1}{3} + \frac{4}{405n} + o\left(\frac{1}{n^2}\right)$$

questa legge è quindi molto importante perchè conferma la legge di Vaucouleurs ed il parametro  $n$ , che definisce la curvatura della brillantezza  $I(R)$ , ci da informazioni sulla luminosità delle galassie:

$$\begin{cases} 0 \leq n \leq 3 & \text{galassie poco luminose} \\ n = 4 & \text{De Vaucouleurs} \\ 5 \leq n \leq 6 & \text{galassie molto luminose} \end{cases}$$

Una caratteristica importantissima di queste galassie è che sono dei sistemi detti **trasparenti**, aventi la proprietà di conservare la luce emessa in ogni direzione, non vi è quindi materia interposta che ne comporta un assorbimento consistente della emissione elettromagnetica. Questo è dovuto ad una presenza irrisoria di mezzo interstellare e gas ma piuttosto ad una consistente presenza di stelle di popolazione II dal colore tendente al rosso. Il mezzo interstellare è presente solo nella sua fase di **HIM** con emissione di tipo di **Bremsstrahlung** [10]. Le galassie ellittiche hanno uno spettro dovuto alla somma degli spettri delle stelle presenti al suo interno con emissione termica di **corpo nero**:

$$B(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)}$$

nota come legge di **Planck** [10]

Il profilo di Brillanza associato alle galassie a spirale, dove compare il raggio di scala  $R_d$  piuttosto che il raggio effettivo, segue invece la legge di **Tully-Fisher**[4] :

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

Nelle spirali, la presenza di stelle con età giovane rispetto alle ellittiche ne delinea una luce risultante dal colore blu.

In queste galassie, la presenza di zone HII, ovvero idrogeno ionizzato, indica la presenza di nubi, gas ed una intensa formazione stellare. Queste sono zone definite anche come **ISM (Inter Stellar Medium)** con emissione nell'ultravioletto con percentuali minori di metallo e la presenza di stelle di Popolazione I. Inoltre, il mezzo interstellare è presente in queste zone in tutte e quattro le sue fasi: **Hot Ionized Medium**  $T \approx 10^6 K$ , **Warm Ionized Medium**  $T \approx 10^4 K$ , **Warm Neutral Medium**  $T \approx 10^2 - 10^4 K$ , **Cold Neutral Medium**  $T \approx 10^1 - 10^2 K$ . I principali processi di emissione sono di tipo termico ed in queste zone in particolare sono di Bremsstrahlung [10], ovvero il principale processo di raffreddamento dell'universo, mentre nella zona del bulge troviamo stelle più vecchie ad emissione di corpo nero. In questo tipo di galassia inoltre si può riscontrare la presenza di un campo magnetico al centro di essa dovuto dalla presenza di un buco nero super massiccio. In queste circostanze si formano dei getti perpendicolari al piano galattico che espellono energia a certe bande di frequenza e che, per motivi di diminuzione della materia e dell'energia, emetteranno, col passare del tempo, a frequenze sempre più basse: queste vengono definite **Radio Galassie** [10], con emissioni di tipo **Sincrotrone** [10].

## Capitolo 3

# Caratteristiche cinematiche delle galassie

Osservate dalla terra, le linee spettrali delle galassie mostrano uno spostamento verso frequenze più basse, cioè un **redshift** descritto dal parametro di redshift  $z$ , e per  $z \ll 1$  si ottiene la legge di Hubble [11] :

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c} = H_0 v$$

considerando la velocità  $v$  della galassia molto piccola rispetto alla quella della luce  $c$  dove  $\lambda_0$  è la lunghezza d'onda degli atomi emessa dalla galassia,  $\lambda$  è la lunghezza d'onda ricevuta sulla terra,  $H_0$  è detta costante di Hubble.

La stabilità, all'interno delle galassie, è un fatto consolidato dallo studio del movimento delle stelle ovvero del libero cammino medio  $\lambda$  per il quale vale un tempo detto di collisionalità  $t_{cg}$  molto alto e che ne consegue una frequenza di collisione stellare molto bassa.

Se ad esempio si pensa alla via Lattea, essa ha un numero di stelle dell'ordine di  $N = 2 \times 10^{11}$ , un raggio galattico  $R_{Gal} = 20 \text{ Kpc} \approx 2 \times 3,08 \times 10^{22} \text{ cm}$  ed il Sole che, da qui in poi verrà indicato con il simbolo  $\odot$ , ha un raggio  $R_{\odot} = 7 \times 10^{10} \text{ cm}$ , la velocità media delle stelle è di circa  $\sigma \approx 250 \text{ Km/s}$  e dalla definizione di libero cammino medio e del tempo di collisione si ottiene

$$\lambda = \frac{R_{Gal}^3}{3NR_{\odot}^2} \quad , \quad t_{cg} = \frac{\lambda}{\sigma} \Rightarrow \quad t_{cg} = 4 \times 10^{27} \text{ s} \approx 10^{20} \text{ years}$$

Questi risultati confermano che le collisioni stellari all'interno delle galassie avvengono in tempi molto lunghi.

### 3.1 La dispersione di velocità

Dallo spettro della radiazione elettromagnetica di una galassia, è possibile capire sia se la galassia si avvicina o si allontana rispetto ad un sistema di riferimento e sia ricavare un profilo dei suoi moti interni e la sua velocità di dispersione  $\sigma$ , ovvero la dispersione statistica delle velocità attorno ad un valore medio, essendo considerato l'insieme delle stelle come particelle in un gas. Per le galassie ellittiche è possibile ricavare la loro distanza  $d$  tramite la legge di "**Faber-Jackson**" [4] per la luminosità  $L$  sfruttando inoltre la definizione di densità di flusso  $S$ :

$$L \propto \sigma^4, \quad S = \frac{L}{4\pi d^2} \propto \frac{\sigma^4}{4\pi d^2} \Rightarrow \quad d \propto \sqrt{\frac{\sigma^4}{4\pi S}}$$

Dalla dispersione di velocità  $\sigma$  è inoltre possibile ricavare una importantissima relazione, conseguenza del teorema del viriale, a proposito del rapporto massa e luminosità galattiche che in unita solari è ([6]):

$$2 \leq \frac{M_{gal\odot}}{L_{gal\odot}} \leq 30 \quad , \quad M \simeq \frac{R\sigma^2}{G}$$

Tramite la tecnica di analisi di dati detta PCA ( Principal Component Analysis) è possibile riscontrare una correlazione, per quanto riguarda le galassie ellittiche, tra le variabili  $\sigma, L, R_e$  con l'equazione detta

$$\textbf{Fundamental Plane} \quad \ln(L) = \alpha \ln(\sigma) + \beta \ln(R_e)$$

la quale individua, ponendo  $\alpha \approx 2$   $\beta \approx 1$ , un piano in cui le variabili delle ellittiche giacciono. Questo importante risultato è conseguenza dello stato di equilibrio o "virializzato" delle galassie ellittiche le quali si trovano in una retta parallela alla bisettrice del fundamental plane. Nonostante si pensi che le spirali non vengano descritte dal fundamental plane, un gruppo internazionale di ricercatori guidato da Elena Dalla Bontà [12, 13], astronoma de l' Università di Padova, ha recentemente misurato il piano fondamentale di Abell 1689, un ammasso particolarmente ricco di galassie che si osserva in direzione della costellazione della Vergine ad una distanza di oltre due miliardi di anni luce. Questi ricercatori hanno riscontrato che anche le galassie a spirale, considerando solo i bulges galattici, appartengono a questo piano. Questa è un'ulteriore conferma che i nuclei delle galassie spirali hanno una conformità complessiva di spettro e luce somiglianti alle galassie ellittiche. Infatti il colore stesso dei nuclei delle spirali è tendente al rosso formato principalmente da stelle più "vecchie".

### 3.2 Curve di rotazione

Per quanto riguarda le galassie a spirale invece non abbiamo una dispersione di velocità poiché le stelle ruotano attorno al centro di essa e la luminosità  $L$  segue la legge di "Tully-Fischer" [4] per cui

$$L \propto v_{rot}^4$$

. La curva di rotazione delle galassie viene determinata dal gas presente formato da zone di HI, idrogeno neutro, poiché, avendo emissione a 21 cm, riesce ad oltrepassare qualsiasi ostacolo e può essere specificatamente analizzato. Essa può essere suddivisa in tre zone principali per cui crescerà sino ad un massimo sino ad appiattirsi annullando il moto rotatorio, raggiunta una certa distanza  $R$ :

- Bulge con distribuzione sferica della Massa e densità  $p(r)$  e  $v(r) \approx r$
- Thin Disk con densità superficiale  $\sigma(r)$
- per un raggio  $R$  grande  $v(r) \approx r^{-\frac{1}{2}}$  (regime Keplero)

Tuttavia, la curva non si annulla come ci si aspetterebbe ma tende asintoticamente ad un valore costante. Questo fatto viene giustificato con la presenza di materia oscura.

Dalla teoria dei modelli di Keplero sulle orbite sappiamo che la distanza orbitale di un corpo rispetto ad un altro è dato dalla accelerazione centripeta dovuta alla forza

gravitazionale e dalla velocità circolare  $v_c$ . Un'orbita chiusa sarà quindi il risultato di un equilibrio tra queste due componenti:

$$\frac{v_c^2}{R} = \frac{GM(R)}{R^2} \Rightarrow v_c(R) = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}}$$

$$\rho(r) = \frac{C}{r^\alpha} \quad \text{con} \quad 0 \leq \alpha \leq 3,$$

dove C è costante e la densità è distribuita su superficie sferica con elemento di volume sferico pari a  $4\pi r^2 dr$ .

- crescente per  $\alpha < 2$
- costante se  $\alpha = 2$
- decrescente se  $\alpha > 2$

Questi risultati ci fanno quindi distinguere tre diverse zone della galassia nelle quali le velocità rotazionali hanno andamenti diversi. Tuttavia, raggiunta una certa distanza dal centro galattico, le curve di velocità circolare si appiattisce annullando questo moto.

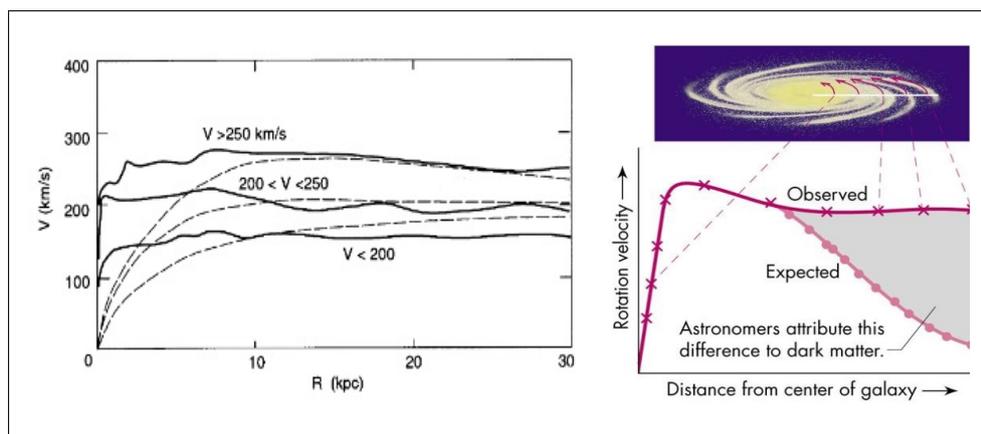


Figura 3.1:

A sinistra: curve di rotazione medie per galassie con velocità di rotazione del disco superiori a 250 km s (in alto), tra 200 e 250 km (al centro) e inferiori a 200 km (in basso); figura da [14].

A destra: Una raffigurazione del confronto tra la curva di rotazione di una galassia a spirale fittata da valori osservati (observed) rispetto alla curva in basso rappresentante i valori previsti (expected); figura da [10].

A conferma di questi fatti, si vuole ricordare lo studio dall'astronomo olandese Oort [4, 6] a proposito della cinematica delle galassie. Egli studiò la velocità relativa  $\nu$  tra due stelle ad una distanza  $l$  ed orbitanti attorno al centro della galassia ad una distanza  $R_0$ . Dopo di ché approssimò la distanza tra le due stelle ad un valore molto minore ( in modo da considerarla trascurabile) rispetto alla distanza dal centro galattico  $l \ll R_0$ .

Il risultato è una velocità relativa composta da una componente parallela ed una perpendicolare nel piano orbitante.

$$\nu = \nu_{\perp} + \nu_{\parallel} \quad \begin{cases} \nu_{\parallel} = Al \sin(2\theta) & , & A = \frac{1}{2} \left( v_0' - \frac{v_0}{R} \right) \\ \nu_{\perp} = Bl + Al \cos(2\theta) & , & B = \frac{1}{2} \left( v_0' + \frac{v_0}{R_0} \right) \end{cases}$$

Le costanti  $A$  e  $B$  prendono il nome di costanti di Oort ed è interessante notare che per il Sole vale

$$\begin{cases} A \approx -15Km/s \\ B \approx 12Km/s \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} |A + B| = v_0' = 3Km/s \\ |A - B| = \frac{v_0}{R_0} = 27Km/s \end{cases}$$

ottenendo come risultato per  $R_0 = 8,5Kpc$  una velocità di rotazione solare di circa  $v_0 \approx 250Km/s$  e con curva di velocità di rotazione già asintoticamente costante. L'evidente appiattimento della curva di rotazione galattica è quindi già riscontrabile nella zona del Sole per quanto riguarda la nostra galassia, portando a pensare che già nei dintorni del sistema solare è presente la materia oscura.

### 3.3 Conclusioni

Le galassie sono quindi oggetti nell'universo che si organizzano in strutture ben definite e che tendono a stabilizzarsi in un equilibrio che è reso possibile dall'interazione fisica tra stelle, gas e polveri. In questo lavoro si è voluto spiegare quali sono i modelli geometrici e matematici che descrivono le galassie e, tramite le proprietà di questi modelli, si è descritto quali sono le caratteristiche principali che le compongono. Si è quindi data una classificazione di tipo morfologico e si è trovata una correlazione con l'età della galassia e dei suoi componenti e moti interni. L'evoluzione fisica e temporale della galassia è l'elemento chiave che ci permette di poter classificare e distinguere questo tipo di oggetti. Si è voluto inoltre accompagnare al ragionamento un lettore non troppo esperto per portarlo alla comprensione e ad una consapevolezza più profonda dei motivi che portano ad interpretare le galassie così come vengono raccontate ai giorni nostri.

# Bibliografia

- [1] Andrea Cabras. *Schema di Hubble*. disegno vettoriale digitale realizzato con Inkscape.
- [2] Francesco Ferraro. Lezioni di astrofisica stellare. *corso di astronomia dell'università di Bologna*.
- [3] Andrea Cabras. *Schema di galassie ellittiche*. disegno vettoriale digitale realizzato con Inkscape.
- [4] Luca Ciotti. Lezioni di astrofisica extragalattica. *corso di astronomia dell'università di Bologna*.
- [5] C. C. Lin and Frank H. Shu. On the Spiral Structure of Disk Galaxies. , 140, August 1964.
- [6] Pietro Giannone. *Elementi di astronomia*. Pitagora editrice Bologna, 2004.
- [7] Andrea Cabras. *Schema di galassie a spirale*. disegno vettoriale digitale realizzato con Inkscape.
- [8] Andrea Cabras. *Coniche*. disegno vettoriale digitale realizzato con Inkscape, 1952.
- [9] Riccardo Benedetti. Lezioni di geometria proiettiva e affine. *corso di fisica dell'università di Pisa*.
- [10] Daniele Dallacasa. Lezioni di processi di radiazione e magneto idro dinamica. *corso di astronomia dell'università di Bologna*.
- [11] Hans C. Ohanian and Remo Ruffini. Gravitazione e spazio tempo. 1997.
- [12] E. Dalla Bontà, R. L. Davies, R. C. W. Houghton, F. D'Eugenio, and J. Méndez-Abreu. A photometric analysis of Abell 1689: two-dimensional multistructure decomposition, morphological classification and the Fundamental Plane. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 474(1), 2017.
- [13] Redazione Inaf. Lezioni di piano fondamentale. 2017.
- [14] Yoshiaki Sofue, Y Tutui, M Honma, A Tomita, T Takamiya, J Koda, and Y Takeda. Central rotation curves of spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, 523(1):136, 1999.