

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

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

Tesi di Laurea

Presentata da:
Giulia Ruggeri

Relatrice:
**Chiar.ma Prof.ssa
Marcella Brusa**

*Al mio cammino,
ai sogni che mi hanno fatto da guida.
A chi mi accompagna da sempre,
a chi mi ha preso per mano strada facendo.*

Indice

Introduzione	1
1 Proprietà morfologiche	2
1.1 Classificazione di Hubble	2
1.1.1 Galassie ellittiche	3
1.1.2 Galassie lenticolari	4
1.1.3 Galassie a spirale	4
1.1.4 Galassie irregolari	6
1.2 La classificazione di de Vaucouleurs	6
2 Proprietà fotometriche	7
2.1 Galassie ellittiche	8
2.1.1 Legge di de Vaucouleurs	9
2.1.2 Leggi di scala e piano fondamentale	10
2.2 Galassie a spirale	11
2.2.1 Tully - Fisher	12
3 Proprietà cinematiche	12
3.1 Galassie ellittiche	13
3.2 Galassie a spirale	13
3.3 Materia oscura e nuove frontiere	15
A Grandezze fotometriche	16
B Primo e Secondo Teorema di Newton	17

Sommario

Come tutte le classificazioni anche quella che riguarda le galassie non può essere definita in modo univoco. Di per sé il concetto di classificazione è irrilevante in quanto dipende dalla preferenza soggettiva di chi la sta facendo, ma può diventare interessante quando si riscontra una componente predittiva, ovvero si riescono a ricavare aspetti che vanno oltre quelli analizzati per farla. Nel primo capitolo si fa riferimento alla classificazione delle galassie fatta da Hubble, realizzata sulla base di considerazioni puramente morfologiche, è quella che è sopravvissuta a tutte le altre in quanto si è rivelata essere ben più profonda. Si procede, nel secondo capitolo, con l'analisi degli aspetti fotometrici che caratterizzano i diversi tipi di galassie mantenendo sempre la suddivisione fatta da Hubble. Nel terzo capitolo si conclude con la trattazione di quella che è la cinematica che caratterizza questi sistemi e si evidenzia come da questa emerga il problema della materia oscura. Ciò permette di fare un breve accenno alla missione *Euclid*, che costituisce un argomento dell'ultim'ora e che negli anni a venire promette di aiutarci a saperne di più sulla natura della materia oscura e sulla validità delle nostre classificazioni.

Introduzione

Poco meno di cento anni fa si pensava che l'Universo fosse confinato alla nostra galassia, la Via Lattea. Oggi, grazie all'intenso lavoro di ricerca da parte degli astronomi del secolo scorso, a cui si è accompagnata la possibilità di disporre di strumenti sempre più potenti, sappiamo che sono presenti galassie in ogni punto della sfera celeste e sono distribuite in modo pressochè uniforme lungo tutto lo spazio. Di fatto, si tratta di enormi agglomerati di gas e stelle e costituiscono i mattoni fondamentali che compongono l'Universo.

Agli inizi del ventesimo secolo i telescopi del tempo non erano ancora riusciti ad osservare le stelle delle galassie e si riteneva che queste fossero semplici nebulose di natura ignota.

Un punto di svolta si ebbe nel 1920, con quello che è passato alla storia come *Il grande dibattito* tra gli astronomi Harlow Shapley e Heber Curtis, in relazione alla natura di un tipo particolare di *nebulae*, ossia quelle che mostravano un disegno a spirale. Queste costituivano la chiave di volta su cui Curtis fondava la sua ipotesi, che le vedeva essere oggetti esterni alla nostra galassia, quegli "universi isola", la cui esistenza era stata postulata, solo su basi speculative, dal filosofo tedesco Immanuel Kant più di 150 anni prima. [1]

La soluzione arrivò quando, negli anni successivi, Edwin Hubble fornì prove inconfutabili che alcune *nebulae* erano in realtà degli immensi aggregati di stelle, del tutto simili alla Via Lattea, poste molto oltre i suoi confini. Infatti l'identificazione di cefeidi¹ all'interno di queste nebulose permise ad Hubble di stimarne la distanza e quindi le dimensioni reali. La Galassia di Andromeda, per esempio, risultò lontana un milione di anni luce, con un'estensione reale molto simile a quella calcolata per la Via Lattea. Con l'ammissione dell'esistenza di altre galassie l'Universo di colpo crebbe in modo spaventoso in dimensioni e la Via Lattea divenne una delle tante galassie a popolare uno spazio sterminato ed estremamente vuoto. [2]

In pochi anni il numero di galassie riconosciute come tali salì repentinamente a qualche migliaio, un numero sufficiente per effettuare degli studi statistici e cercare di farne una catalogazione in base a proprietà che si ripetono.

Oggi, a distanza di più di due secoli dal primo tentativo degli Herschel di mappare la Via Lattea, disponiamo di strumenti e tecniche fotografiche che ci hanno permesso di ottenere risultati sempre più precisi riguardo la distribuzione di stelle all'interno della nostra galassia e non solo. Il prossimo passo, allora, è quello di mappare ciò che non si vede ma che sappiamo esserci: la materia oscura; è questo l'obiettivo della missione *Euclid*, che ha preso avvio lo scorso luglio e che si prepara ad aprire la strada verso nuovi orizzonti.

¹Le cefeidi sono stelle variabili pulsanti, importanti perché permettono di misurare le distanze delle galassie. Misurando il periodo di una cefeide si può risalire alla sua luminosità reale che, confrontata con quella apparente, consente di stimare le distanze.

1 Proprietà morfologiche

Un primo passo per studiare qualcosa che non si conosce consiste nell'osservare e cercare di catalogare ciò che si sta vedendo. Per quanto riguarda le galassie, ci si accorge che la maggior parte di queste può essere suddivisa in due grandi gruppi in base alla loro forma: ellittiche e a spirale.

Tale classificazione morfologica fornisce un quadro all'interno del quale le proprietà quantitative delle galassie possono essere discusse in modo sistematico. Tuttavia, è bene tenere presente che sono oggetto di indagine soltanto le galassie che sono abbastanza grandi e luminose da essere visibili nel cielo; inoltre, queste appariranno all'osservatore in modo diverso in base a fattori legati a lunghezza d'onda, orientazione e redshift.

Pertanto, come tutte le classificazioni, anche quelle proposte per le galassie presentano una componente soggettiva, in quanto sono il risultato di una valutazione di un'immagine da parte di un essere umano.

1.1 Classificazione di Hubble

La classificazione più diffusa e che, ancora oggi, viene presa come punto di riferimento è quella proposta da Edwin Hubble nella sua opera *The Realm of the Nebulae* nel 1936. Il diagramma di Hubble è mostrato in Figura 1. I vari tipi di galassie sono ordinati in sequenza, da quelle che vengono definite *Early Type* a quelle dette *Late Type*².

Sull'impugnatura del "diapson" sono posizionate le galassie che non mostrano forme o strutture particolari, appaiono soltanto come sferoidi, luminose e definite, quindi ellittiche. Sulle due diramazioni sono poste le galassie con struttura a spirale, dalle più strette alle più larghe, e quelle che, dotate di spirale, presentano anche una barra centrale, di nuovo dalle più strette alle più larghe e chiamate a spirale barrata. Galassie non assegnabili ad alcuna di queste categorie vengono identificate come irregolari.

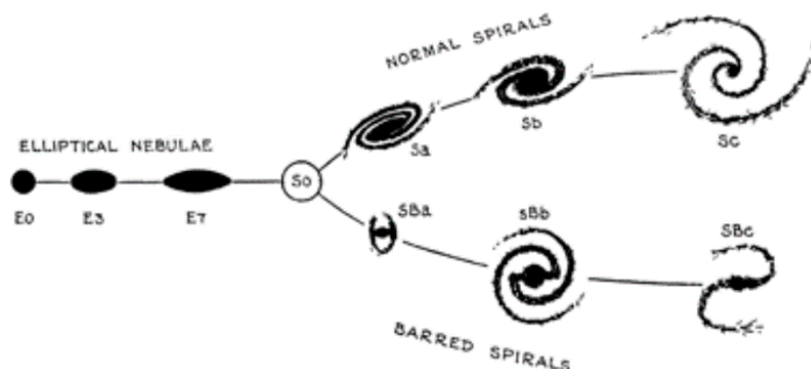


Figura 1: Diagramma a "diapson" di Hubble nella versione del 1936, pubblicata nell'opera *The Real of the Nebulae*. [3]

²Nell'interpretazione originale del diagramma, Hubble raggruppa le galassie ellittiche e lenticolari come *Early Type*, mentre parla di *Late Type* per riferirsi alle galassie a spirale e irregolari.

Inizialmente, Hubble diede al diagramma un significato evolutivo: le galassie nascono come ellittiche E0 e successivamente, sotto l'influenza della forza centrifuga causata dalla rotazione attorno al centro, si schiacciano fino a formare dei dischi sottili con dei bracci a spirale. Questa interpretazione si rivelò ben presto errata, ma la classificazione si reggeva su delle basi molto più solide, tanto che, ancora oggi, rimane quella più utilizzata sebbene leggermente ampliata.

Con lo sviluppo della ricerca, che ha portato ad identificare un numero sempre maggiore di galassie, è stato possibile estendere l'originale classificazione di Hubble con l'aggiunta di nuove classi ed eliminare tutti i riferimenti in chiave evolutiva.

1.1.1 Galassie ellittiche

Fanno parte di questa categoria tutte le galassie che presentano una forma tondeggiante priva apparentemente di strutture evidenti e caratterizzate solitamente da un colore tendente al rosso, che deriva dalla dominante presenza di stelle antiche e da una quantità minima, se non nulla, di gas e polveri.

La classe viene contrassegnata con la lettera E e con numeri da 0 a 7 ad indicare una forma che dalla sfera quasi perfetta diventa sempre più allungata. La numerazione, o meglio, il grado di ellitticità, deriva dalla formula

$$n = \left[10 \left(1 - \frac{b}{a} \right) \right] \quad (1.1)$$

dove a e b sono il semiasse maggiore e minore dell'ellisse.

In realtà la forma con cui si presentano le galassie ellittiche dipende fortemente dal punto di osservazione: una galassia può apparire tonda soltanto perchè la si osserva lateralmente, mentre, per esempio, potrebbe trattarsi di una galassia allungata, estesa parallelamente alla direzione di vista. Infatti, è importante tenere presente che quella che si osserva è la proiezione bidimensionale di ellissoidi di rotazione che possono presentarsi in diverse forme, alcuni esempi sono mostrati in Figura 2.

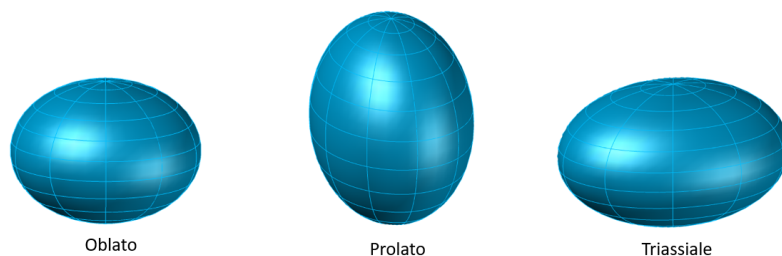


Figura 2: Esempi di strutture 3D di galassie ellittiche realizzate con AutoCad. Da sx a dx: ellissoidi di rotazione ottenuti ruotando un'ellisse attorno all'asse minore (oblato) o maggiore (prolato), ellissoidi triassiali aventi tutti e tre gli assi diversi.

Dall'immagine 2D è molto difficile riuscire a ricavare la forma tridimensionale dell'ellissoide galattico, ma emerge una considerazione importante: la proiezione sulla sfera celeste può rendere la galassia più sferica di quanto non sia in realtà ma non la potrà mai far apparire più schiacciata. Inoltre, il fatto che non siano mai state osservate ellittiche superiori alle E7 porta a pensare all'esistenza di un limite all'eccentricità.

Nel corso degli anni, si è scoperto che le galassie che appartengono a tale categoria presentano altre proprietà in comune che vanno oltre l'aspetto puramente morfologico. Innanzitutto non ci sono eccezioni note sul fatto che al centro di una galassia ellittica c'è sempre un *Supermassive Black Hole*, la cui massa è legata a quella dell'intera galassia dalla relazione di Magorrian: $M_{BH} \simeq 10^{-3} M_*$.

Inoltre, le regioni centrali delle galassie ellittiche hanno le popolazioni stellari più metalliche dell'universo, dette *Super Metal Rich*. Studi spettroscopici mostrano come la presenza di metalli vada scemando man mano che ci si allontana dal centro galattico, con una distribuzione che sembra dipendere esclusivamente dalla densità locale di stelle e non dalle galassie. Inoltre l'età delle stelle, generalmente, sembra essere più elevata al centro e all'esterno, con una fase di "ringiovanimento" nella parte intermedia, il che sembra legato da una parte alla presenza del buco nero centrale, che potrebbe inibire la formazione di nuove stelle, e dall'altra all'acquisizione di stelle di galassie satelliti in tempi remoti [4].

1.1.2 Galassie lenticolari

Da un punto di vista morfologico questa categoria di galassie, identificate come S0, rappresenta un punto di transizione tra le ellittiche e le spirali. In particolare sono costituite da un nucleo e un disco all'interno del quale, tuttavia, non sono osservabili strutture a spirale; queste galassie si presentano con una caratteristica forma "a lente" e vengono, quindi, dette lenticolari. Si tratta di oggetti generalmente dotati di poca materia interstellare e di conseguenza presentano un tasso di formazione stellare molto basso. Questo può condurre ad errori nella loro classificazione qualora siano viste di taglio. Studi successivi hanno creato una sottoclasse anche per le galassie lenticolari (si veda paragrafo 1.2).

1.1.3 Galassie a spirale

La maggior parte delle galassie conosciute, tra cui M74 (in Figura 3) e la stessa Via Lattea, appartengono a questa categoria.

Ciò che le contraddistingue è la presenza di una struttura a spirale nel disco; inoltre mostrano un rigonfiamento centrale strutturalmente simile ad una galassia E ed un disco stellare come quello delle S0. Oltre a questi c'è un sottile disco di gas e altra materia interstellare, dove stanno nascendo giovani stelle, che formano lo schema a spirale.



Figura 3: M74 è una galassia a spirale, come la Via Lattea, che appare *face-on* vista dalla Terra. L'immagine è il risultato della combinazione di osservazioni in diverse bande. Webb delinea gas e polvere nell'infrarosso mentre i dati di Chandra mettono in luce l'attività ad alta energia delle stelle a lunghezze d'onda dei raggi X. I dati ottici di Hubble mostrano ulteriori stelle e polvere. [5]

Nel diagramma di Hubble le galassie a spirale si dividono in due gruppi a seconda che abbiano o meno una barra che attraversa il nucleo e dalle cui estremità si diramano i bracci; in tal caso la galassia si dice a spirale barrata e si indica con SB. All'interno di ciascuna classe di spirali, normali o barrate, si distinguono tre sottoclassi *a*, *b*, *c*, che dipendono dalla combinazione dei seguenti criteri:

1. Forma dei bracci: muovendosi dalla *a* alla *c* i bracci diventano meno avvolti.
2. Dimensioni del bulge centrale: proporzionalmente al disco le *Sa* hanno un bulge più grande rispetto alle *Sb* e *Sc*.
3. Formazione stellare: la quantità di gas contenuto nelle galassie aumenta andando verso la *c*, dove, di conseguenza, l'attività di formazione stellare risulta più intensa e le galassie più blu.

La Figura 4 mostra gli elementi costitutivi di una tipica galassia a spirale, riportati di seguito:

- *Bulge*: è composto principalmente da stelle vecchie ed è molto simile ad una piccola galassia ellittica. Al centro presenta un *Supermassive Black Hole* avente una massa che rispetta, a sua volta, la relazione di Magorrian.
- *Disco*: è situato intorno al bulge e si divide in disco sottile e disco spesso. Il disco sottile è la regione in cui la formazione stellare è molto attiva, contiene le stelle più giovani e gran parte del gas e delle polveri; la parte spessa, invece, è costituita da stelle più vecchie. Le stelle del disco sottile tendono ad avere una metallicità più elevata di quelle del disco spesso.

- *Bracci a spirale*: sono onde di densità che si muovono lungo il disco in modo indipendente rispetto a gas e stelle, le quali, quando lo attraversano, si ritrovano raggruppate rendendo visibile l'onda come un accumulo di densità.
- *Alone*: è una sfera costituita da stelle vecchie, ammassi globulari e materia oscura che si estende sotto e sopra il disco galattico.

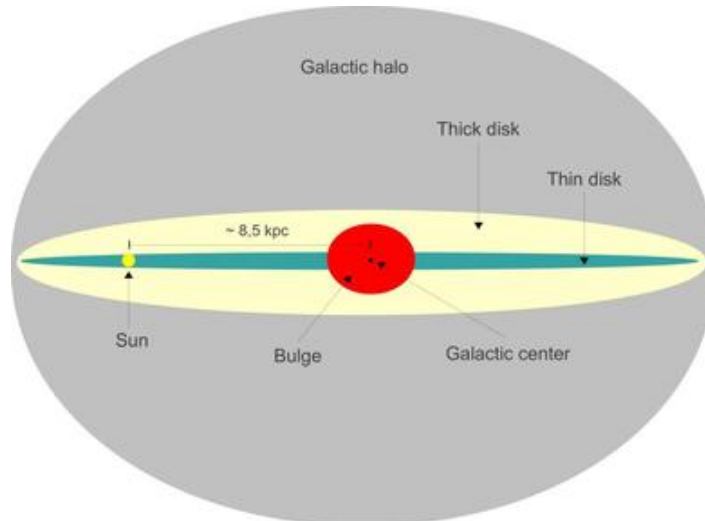


Figura 4: Rappresentazione di taglio della Via Lattea con le varie strutture presenti al suo interno (non in scala). [6]

1.1.4 Galassie irregolari

La sequenza di Hubble originale prevede la suddivisione delle galassie identificate come irregolari in due gruppi.

Si definiscono Irr I le galassie prive di una qualche simmetria in cui è possibile distinguere delle zone più luminose contenenti stelle di tipo O e B ³. Le galassie Irr II sono, invece, oggetti non simmetrici la cui immagine si presenta piuttosto liscia e priva di strutture riconoscibili.

Tuttavia, lavori successivi hanno ritenuto necessaria una rivisitazione della proposta fatta da Hubble per questo tipo di galassie e non solo.

1.2 La classificazione di de Vaucouleurs

Nel 1959 la classificazione di Hubble fu oggetto di un'importante revisione ad opera dell'astronomo francese Gérard Henri de Vaucouleurs, ritenendo che tale suddivisione non rendeva giustizia alla grande varietà morfologica con cui le galassie si presentano in natura. Senza andare nel dettaglio, questa nuova versione, mostrata in Figura 5,

³Si fa riferimento alla classificazione di Harvard secondo cui fanno parte di queste classi le stelle bianco-azzurre con una temperatura superficiale tra 35000 – 20000K (classe O) ed intorno ai 15000K (classe B). [7]

vede il prolungamento del diagramma di Hubble con l'aggiunta di ulteriori sottoclassi per le galassie a spirale.

De Vaucouleurs introduce la notazione SA per identificare le galassie non barrate, in contrapposizione alle SB con le quali Hubble identificava i sistemi barrati; il caso intermedio viene contrassegnato con la sigla SAB.

In relazione alle classi delle spirali e delle lenticolari, de Vaucouleurs riconosce anche due varietà: quella a "forma di anello", segnalata con il simbolo r e quella a "forma di S" indicata con il simbolo s . La prima varietà include gli oggetti che presentano archi o anelli di forma ellittica (caso delle S0) oppure che evidenziano dei bracci di spirale che emergono tangenzialmente da un anello circolare interno (caso delle S). Fanno parte della seconda varietà gli oggetti che manifestano due bracci principali che si dipartono da un nucleo centrale di aspetto globulare o allungato (caso delle SA) oppure da una barra (caso delle SB).

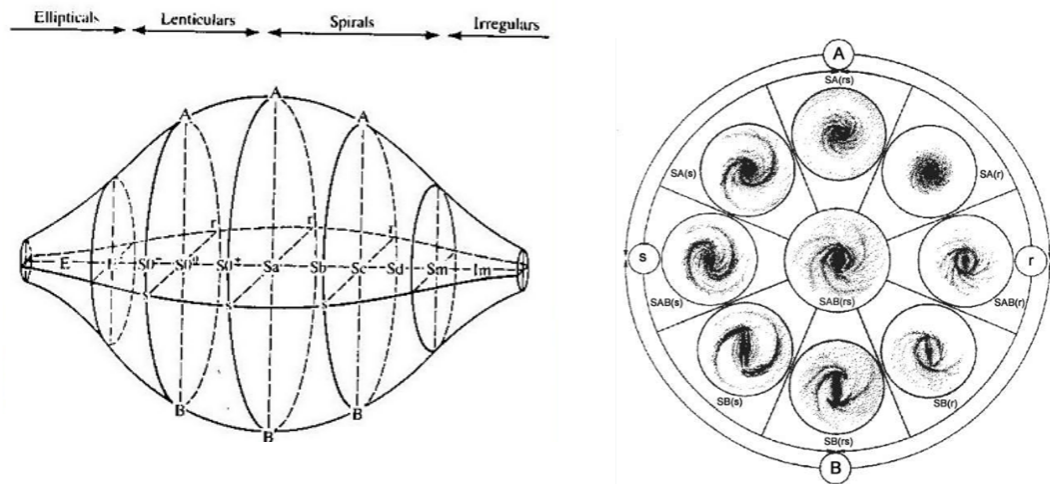


Figura 5: A sinistra, schema tridimensionale che illustra la classificazione delle galassie introdotta da G. de Vaucouleurs. A destra si riporta una sezione del "fuso", in corrispondenza delle galassie Sb. [8]

2 Proprietà fotometriche

Come per tutti gli oggetti astronomici, l'unica informazione che si ha a disposizione è data dalla luce che raggiunge la Terra e i nostri strumenti nello spazio.

L'osservazione fotometrica delle galassie, cioè la misurazione della quantità di energia che viene emessa ad una certa lunghezza d'onda, consente di risalire a come queste sono strutturate, cioè qual è la forma che in realtà assumono nello spazio tridimensionale e di come sono distribuite le stelle al loro interno. A seconda della banda attraverso cui si stanno compiendo le osservazioni saranno visibili componenti diverse del sistema, come è mostrato in Figura 6:

- $H\alpha$: si vede la distribuzione del gas ionizzato;
- Infrarosso: si vede la distribuzione della polvere;
- Banda ottica: si ricavano informazioni sulla densità di stelle;
- Raggi X: si vede la distribuzione dei resti di supernova, degli oggetti compatti e l'alone, eventualmente presente.

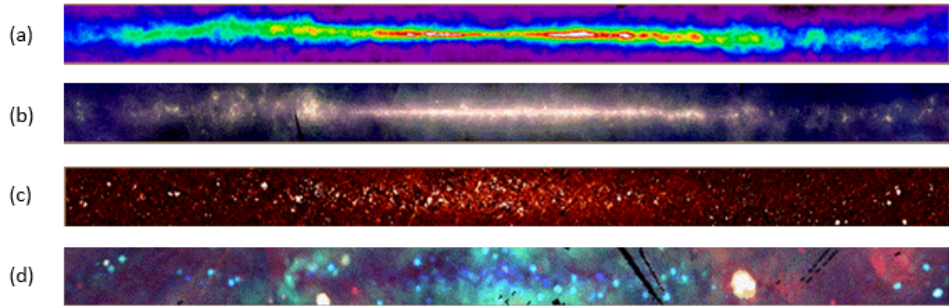


Figura 6: piano della Via Lattea osservato a diverse frequenze: (a) $H\alpha$; (b) infrarosso; (c) ottico; (d) raggi X. [9]

Le principali grandezze fotometriche utilizzate in questo capitolo sono definite in appendice A.

2.1 Galassie ellittiche

In buona approssimazione, le galassie ellittiche possono essere considerate oggetti trasparenti, in quanto non c'è sovrapposizione tra le stelle che le compongono. Questo comporta che la luminosità di questi sistemi venga conservata anche nell'immagine bidimensionale.

Assumendo una distribuzione di luminosità a simmetria sferica la luminosità proiettata si ricava come

$$L_P = 2\pi \int_0^\infty R I(R) dR \quad (2.1)$$

Per ricostruire la distribuzione della luce all'interno delle galassie si costruiscono dei profili di brillantezza. Inoltre, poichè le ellittiche sono piuttosto simmetriche, è possibile tracciare delle curve di uguale luminosità, chiamate isofote che sono molto utili per cercare di capire la distribuzione di luminosità all'interno della galassia e cercare di dare un limite alle sue dimensioni; nel caso della proiezione di un ellissoide trasparente queste sono delle ellissi coassiali. In particolare se si considera un ellissoide triassiale in cui gli assi a, b, c cambiano in funzione della buccia può succedere che le isofote siano ruotate l'una dentro l'altra, in questo caso, si parla di *Isophotal Twisting*⁴.

⁴L'eterogeneità e la triassialità dell'ellissoide sono condizioni necessarie ma non sufficienti per avere *Isophotal Twisting*.

Tuttavia le galassie ellittiche non sembrano avere dei confini ben precisi, infatti l'estensione della loro immagine dipende molto dallo stato del cielo e dalla risoluzione dello strumento. Per evitare problemi e incomprensioni si è arrivati a definire una quantità detta *raggio effettivo* (R_e) che rappresenta il raggio dell'immagine che contiene metà della luminosità dell'oggetto considerato

$$L_P(R_e) = \frac{L_{TOT}}{2} \quad (2.2)$$

Questa definizione è utilizzata anche per il bulge delle spirali, il che rafforza ulteriormente la somiglianza tra queste due classi di oggetti.

2.1.1 Legge di de Vaucouleurs

Nel 1948 i coniugi de Vaucouleurs analizzarono un campione di galassie ellittiche e si accorsero che osservando il profilo di brillantezza $I(R)/I(0)$, in un grafico in funzione di R/R_e , per ogni galassia ellittica, l'andamento era sempre lo stesso. A prescindere da forma e dimensioni, qualsiasi oggetto ellittico appare fatto sempre allo stesso modo, e segue quello che viene definito profilo di de Vaucouleurs, mostrato in Figura 7 e descritto dalla funzione

$$I(R) = I(0) e^{-7.67 \left(\frac{R}{R_e}\right)^{3/4}}. \quad (2.3)$$

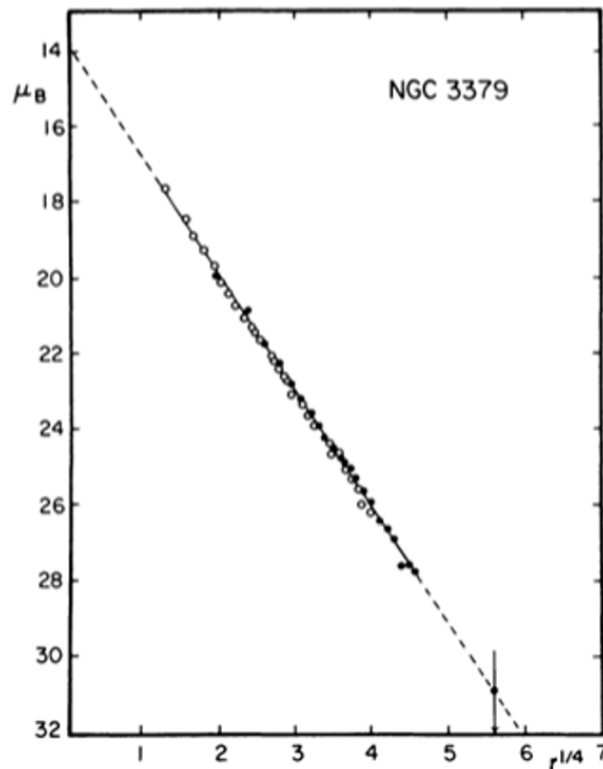


Figura 7: Profilo di luminosità, in termini di μ_B Vs $r^{1/4}$, della galassia ellittica NGC 3379. Si nota che i dati seguono l'andamento della legge di de Vaucouleurs (tratteggiata). [10]

Una generalizzazione della legge di de Vaucouleurs è stata data successivamente ed è nota come legge di Sérsic

$$I(R) = I(0) e^{-b\left(\frac{R}{R_e}\right)^{\frac{1}{m}}}. \quad (2.4)$$

Dato un profilo di Sérsic con una certa *slope* m , b può essere ricavata dalla serie asintotica $b(m) = 2m - 1/3 + o(1/m)$.

2.1.2 Leggi di scala e piano fondamentale

Alla fine degli anni '70 del secolo scorso, gli astronomi osservativi si resero conto che le galassie ellittiche obbediscono ad una serie di leggi dette *Leggi di scala*. Si tratta di relazioni empiriche che legano proprietà intrinseche a quantità osservabili, quali la luminosità (L), la dispersione di velocità osservata (σ_{oss}), il raggio effettivo (R_e) e la brillantezza superficiale.

Faber-Jackson

evidenzia una correlazione tra la dispersione delle velocità e la luminosità assoluta della galassia: $L \propto \sigma_{oss}^4$.

Kormendy

mette in relazione la luminosità assoluta della galassia con il raggio effettivo: $L \propto R_e^\alpha$, che diventa $\langle I_e \rangle \propto R_e^{\alpha-2}$, in termini di brillantezza superficiale media.

$D_n - \sigma$

esprime un legame tra la dispersione di velocità e il raggio effettivo: $R_e \propto \sigma_{oss}^\gamma$.

Tutte queste tre leggi costituiscono degli strumenti per misurare la distanza delle galassie ⁵. Tuttavia le correlazioni non sono strette, ma presentano una dispersione dei dati fino al 40%, non riducibile.

Nel 1987, Djorgovsky, con l'applicazione della *Principal Component Analysis* ⁶ mostrò che, in realtà, le leggi di scala sono solo le proiezioni di una relazione più completa, a tre componenti, che individua il piano fondamentale delle galassie ellittiche [11]

$$\alpha \log \sigma + \beta \log R_e + \gamma \log L = \delta. \quad (2.5)$$

La dispersione delle singole leggi di scala è dovuta al fatto che questo piano è inclinato e di conseguenza appare più spesso se osservato lungo uno dei piani coordinati.

⁵La distanza di un oggetto celeste si può ottenere dalla relazione tra luminosità apparente e luminosità assoluta $l = \frac{L}{4\pi d^2}$; in alternativa si procede con il confronto tra le dimensioni reali, ricavate dalla legge, con quelle angolari, osservate.

⁶Tecnica di analisi statistica che permette di individuare le relazioni rilevanti tra le variabili che descrivono un sistema, così da eliminare il pregiudizio di chi sta compiendo l'analisi.

Il piano fondamentale, riportato di seguito (Figura 8), racchiude qualcosa di profondo in quanto ci dice che in natura le galassie ellittiche possono esistere soltanto con combinazioni precise di luminosità, dimensioni e dispersione di velocità.

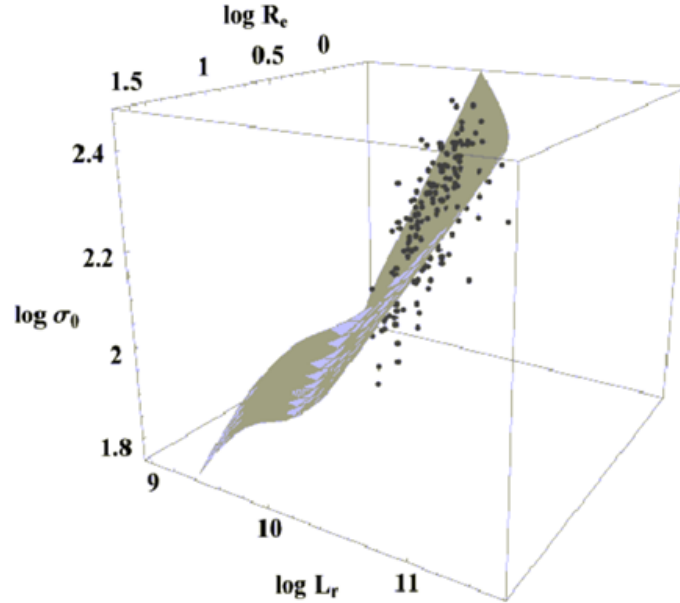


Figura 8: Piano fondamentale delle galassie ellittiche, ottenuto dalla combinazione lineare fra tre quantità osservabili, in scala logaritmica: la dispersione di velocità, il raggio efficace e la brillantezza superficiale entro tale raggio. [2]

2.2 Galassie a spirale

Questi sistemi richiedono una trattazione più complessa in quanto costituiti da un bulge e da un disco, dove è possibile distinguere una struttura a spirale. Inoltre, galassie di questo tipo, di solito, contengono una significativa quantità di polvere che impedisce di poter considerare il sistema trasparente.

Come discusso in precedenza, il profilo di luminosità del bulge delle galassie a spirale è descritto dalla legge di de Vaucouleurs ed è un elemento pressochè indipendente.

Il disco, invece, segue un andamento regolato da una legge di tipo esponenziale: aumentando la distanza dal centro la luminosità superficiale del disco diminuisce secondo la legge $I(R) = I(0) e^{-\frac{R}{h_R}}$.⁷

Un aspetto interessante fu evidenziato da Freeman nel 1970, scoprendo che le galassie a spirale tendevano ad avere la stessa luminosità superficiale nelle zone centrali, con $\mu_{0,B} = 21.65 \pm 0.30$ [mag/arcsec²]. [12]

Tuttavia, negli anni a seguire, i risultati furono messi in discussione con la motivazione che la legge derivasse da un bias di selezione. Infatti, sembra che Freeman scelse, per

⁷ h_R è la lunghezza di scala, definita come il raggio a cui la galassia ha una luminosità inferiore di un fattore e ($\simeq 2.7$) rispetto al suo centro.

la sua analisi, le galassie più grandi possibili con un raggio che si adattasse completamente alle lastre di osservazione del *Palomar Observatory*, il che le portava ad essere sbilanciate verso l'uniformità⁸.

2.2.1 Tully - Fisher

La relazione di scala più importante che riguarda le galassie a spirale è quella scoperta dagli astronomi Tully e Fisher nel 1977. Questa legge lega la luminosità assoluta di una galassia alla velocità di rotazione misurata attraverso l'HI:

$$L_{DISCO} \propto v_{HI}^4. \quad (2.6)$$

Anche la Tully - Fisher può essere utilizzata per risalire alla distanza delle galassie osservate, oggi però si preferisce ricorrere ad altri metodi, più precisi. Ciò che suscita maggiore interesse è che questa relazione evidenzia un legame tra materia barionica e materia oscura⁹. Questo implica che la luminosità e la cinematica di galassie a spirale obbediscano a delle regole stringenti.

3 Proprietà cinematiche

La cinematica stellare si occupa dello studio del movimento delle stelle all'interno di una galassia, tralasciando le cause che lo hanno generato.

Lo studio della cinematica delle galassie si basa su osservazioni spettroscopiche e sfrutta il fenomeno dell'effetto Doppler, secondo il quale la radiazione emessa da una sorgente in movimento viene rilevata da un osservatore fisso ad una frequenza diversa da quella emessa.

Quindi, dall'analisi dello spettro, la formula

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \simeq \frac{v_{rad}}{c} \quad (3.1)$$

consente di ricavare la velocità radiale.

Si distingue, inoltre, un moto disordinato identificato da una *velocità di dispersione* (σ), legata all'allargamento delle righe spettrali, e una *velocità di rotazione* (v), connessa ai moti ordinati che provocano uno spostamento del centroide della riga.

⁸Dopo aver tenuto conto degli effetti di selezione, la legge di Freeman è stata confermata nel 2010 per un campione di 30000 immagini di galassie, ottenute dal progetto *Sloan Digital Sky Survey*. [13]

⁹La velocità di rotazione misurata attraverso l'idrogeno neutro evidenzia la presenza di materia oscura, mentre la luminosità della galassia è indice della massa. L'esistenza di questa relazione sembra suggerire che nel processo di formazione delle galassie i barioni siano stati "guidati" dagli aloni di materia oscura.

3.1 Galassie ellittiche

Nelle galassie ellittiche il moto delle stelle avviene in maniera quasi totalmente casuale; infatti, in molti casi, la velocità di rotazione media della galassia risulta pressochè nulla. Quindi, per preservare la presenza di una rotazione delle stelle che impedisca loro di cadere al centro della galassia, deve essere che queste non ruotino tutte nella stessa direzione ma in maniera piuttosto casuale. In realtà, è presente una componente rotazionale dell'intero ellissoide galattico ma di intensità molto minore rispetto alla dispersione della velocità.

Si potrebbe pensare, inoltre, che lo schiacciamento delle galassie ellittiche sia legato alla velocità con la quale questi sistemi ruotano, ma in questo caso dovrebbe esserci una relazione tra appiattimento, velocità di rotazione e velocità di dispersione. In altre parole, affinché si abbia uno schiacciamento causato dalla rotazione, le stelle dovrebbero possedere un'apprezzabile componente ordinata della velocità.

Si è osservato che le galassie si presentano in due ampie varianti, *slow rotators* e *fast rotators*, a seconda che mostrino o meno una chiara rotazione su larga scala. [14]

I rotatori lenti sono più comuni tra i sistemi massicci e sono generalmente classificati come E0-E4. I rotatori veloci sono più deboli e sono classificati come E aventi ellitticità più alte o S0. Questi risultati suggeriscono fortemente che i rotatori lenti e veloci sono in realtà due diverse famiglie di galassie.

3.2 Galassie a spirale

Dallo studio dello spettro, anche per le galassie a spirale, è possibile analizzare il moto delle stelle attorno al centro di massa e ricavare quella che viene definita curva di rotazione; si tratta di una proprietà intrinseca di un qualsiasi oggetto dotato di massa, che diventa visibile nel momento in cui è presente un tracciante (e.g. gas).

La curva di rotazione di un oggetto puntiforme si ottiene nella maniera seguente:

$$\frac{v_C^2(r)}{r} = \frac{GM}{r^2} \quad \longrightarrow \quad v_C(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (3.2)$$

ed è detta *curva di rotazione kepleriana* ($\propto \frac{1}{\sqrt{r}}$).

Per una galassia a spirale, anche per quanto riguarda lo studio del moto, si procede analizzando separatamente il *bulge* e il *disco*.

- In corrispondenza del *bulge* si osserva un andamento $v_C \propto r$

$$M(r) = 4\pi\rho_0 \int_0^r x^2 dx = \frac{4\pi}{3}\rho_0 r^3 \quad (3.3)$$

$$v_c^2(r) = \frac{4\pi G}{3}\rho_0 \frac{r^3}{r} = Ar^2. \quad (3.4)$$

- Nella regione più interna del *disco* la curva si appiattisce. Infatti sparisce la dipendenza della velocità di rotazione dal raggio in quanto si ha a che fare con un oggetto la cui simmetria è riconducibile a quella di un disco sottile. Allontanandosi verso le regioni periferiche il potenziale gravitazionale è dominato dal termine di monopolo ($\sim -\frac{GM}{r}$) che ci si aspetta si manifesti in un andamento *kepleriano* della curva di rotazione.

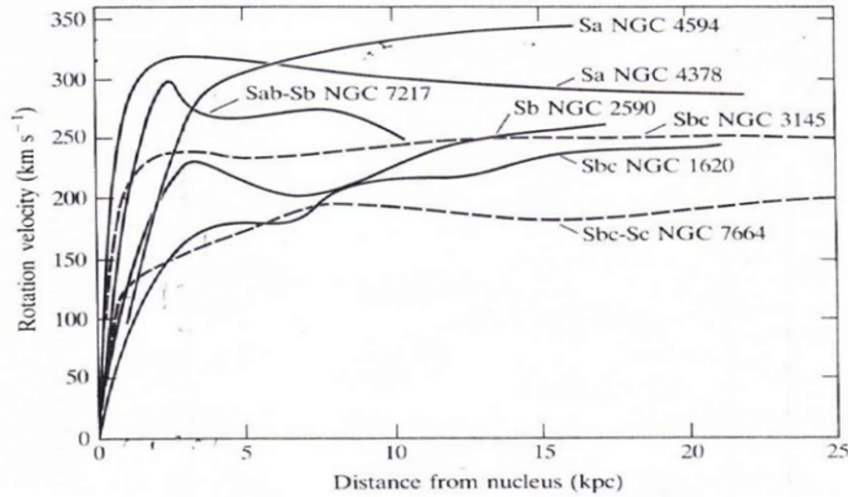


Figura 9: Curve di rotazione corrispondenti a sette galassie a spirale. In nessuna di queste si riscontra un andamento della curva di tipo *kepleriano*. [15]

A metà degli anni '70 ci si accorse che la curva di rotazione, costruita in base alle osservazioni fatte attraverso la riga a 21 *cm* dell'HI, rimaneva piatta anche a grandi distanze dal centro, come si nota dal grafico in Figura 9.

Tale evidenza portò a prendere in considerazione l'esistenza di quella che viene detta *materia oscura*, già ipotizzata qualche anno prima da Vera Rubin su ipotesi, tuttavia, sbagliate¹⁰.

Assumendo la presenza di una certa quantità di materia oltre il disco galattico, che però non riusciamo a rivelare, avente una distribuzione di densità $\rho(r) = A/r^2$, si ritrova una curva di rotazione piatta:

$$M(r) = 4\pi \int_0^r \frac{Ar^2}{r^2} dr = 4\pi Ar \quad (3.5)$$

$$v_c^2(r) = \frac{4\pi GA}{r} = 4\pi GA = \text{cost} \quad (3.6)$$

¹⁰La curva di rotazione ipotizzata dalla Rubin per le galassie a spirale si fondava sulla validità dei Teoremi di Newton, senza tener conto che questi si applicano solo al caso di un oggetto a simmetria sferica e non per un disco, come lo sono le galassie a spirale. (Si veda appendice B).

3.3 Materia oscura e nuove frontiere

Insieme, energia oscura e materia oscura costituiscono circa il 95% dell'Universo, ma la loro natura e proprietà sono ancora poco conosciute.

Nel corso del ventesimo secolo siamo riusciti ad analizzare e classificare le galassie in base a proprietà morfologiche e fotometriche, ne abbiamo studiato la cinematica e questo ha portato a dover ammettere l'esistenza di una certa quantità di materia a noi sconosciuta.

Il telescopio Euclid dell'ESA, lanciato lo scorso 1 luglio, è pronto ad aprire un nuovo capitolo con un'ambiziosa mappatura dell'Universo basata sulla distribuzione di materia oscura.

La missione è progettata per esplorare la composizione e l'evoluzione dell'Universo oscuro. Il telescopio spaziale spazzerà più di un terzo di cielo e creerà una grande mappa della struttura dell'Universo su larga scala attraverso lo spazio e il tempo osservando miliardi di galassie lontane fino a 10 miliardi di anni luce, con lo scopo di rivelare di più sul ruolo della gravità e sulla natura dell'energia oscura e della materia oscura.

Il telescopio osserverà il cielo con due telecamere contemporaneamente: una nello spettro visibile e l'altra nell'infrarosso, in modo da condurre due tipi di analisi. Attraverso le immagini nel visibile, infatti, si cercherà di individuare la presenza di sottili distorsioni che tipicamente comprimono le forme apparenti delle galassie di meno dell'1% in una direzione o nell'altra. Mappando ampie fasce di cielo, queste distorsioni possono rivelare la presenza di enormi masse che curvano lo spazio e piegano la luce proveniente da oggetti sullo sfondo, un fenomeno chiamato *lente gravitazionale*. Questo consentirà ai cosmologi di misurare se la materia oscura si presenta come una struttura densa e sottile o più gonfia, che a sua volta potrebbe fornire indizi sulla natura delle particelle elementari che la compongono.

La seconda analisi esplorerà la distribuzione delle galassie, andando a cercare le onde residue del brodo primordiale che componeva l'Universo. Queste *oscillazioni barioniche acustiche* sono state utilizzate in precedenza per tracciare il tasso di espansione dell'Universo nel corso della sua storia, ma Euclid sarà in grado di spingere questo tipo di studi ancora più indietro nel tempo.[16]

E' passato più di un secolo dalla prima classificazione fatta da Hubble e gli studi condotti da allora ne hanno confermato la validità, dimostrando il suo fondamento su basi ben più solide. A questo punto manca ancora un tassello per completare il quadro, quello della materia oscura, e saperne di più sul suo conto potrebbe portare a mettere in luce nuove proprietà in base alle quali possa emergere una classificazione che confermi la profondità di quella già esistente o evidenziare qualcosa di nuovo.

A Grandezze fotometriche

Si definiscono alcune quantità astrofisiche osservabili, spesso utilizzate nella trattazione dei processi radiativi [9]:

- Luminosità monocromatica

$$L(\nu) = 4\pi d^2 S(\nu) \quad [\text{erg s}^{-1} \text{Hz}^{-1}]$$

dove con d si indica la distanza tra la sorgente e l'osservatore.

- Luminosità bolometrica

$$L = \int_0^\infty L(\nu) d\nu \quad [\text{erg s}^{-1}]$$

- Densità di flusso

$$S(\nu) = \frac{L(\nu)}{4\pi d^2} \quad [\text{erg s}^{-1} \text{Hz}^{-1} \text{cm}^{-2}]$$

- Brillanza

$$I(R) = \frac{S}{\Omega} = \frac{L}{4\pi R^2} \quad [\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}]$$

dove Ω rappresenta l'angolo solido sotteso dalla sorgente ed R il suo raggio.

B Primo e Secondo Teorema di Newton

I *teoremi di Newton* riguardano il campo gravitazionale prodotto da un materiale distribuito in modo omogeneo lungo gusci sferici.

Il campo gravitazionale esercitato in un punto x da un corpo esteso, avente densità $\rho(y)$, come può essere una stella, un pianeta o una galassia può essere espresso nel modo seguente

$$g(x) = -G \int_{\mathbb{R}^3} \frac{x-y}{\|x-y\|^3} \rho(y) d^3y. \quad (\text{B.1})$$

Nel caso di un guscio sferico infinitesimo e omogeneo la distribuzione di densità è

$$\rho(y) = \frac{M\delta(r-R)}{4\pi r^2}, \quad r \equiv \|y\|. \quad (\text{B.2})$$

Sfruttando la simmetria del campo, si procede con l'integrazione di g in $x = (0, 0, r)$ e si ottiene

$$g(x) = -\frac{GM}{2r^2} \left(1 + \frac{r-R}{|r-R|} \right) \hat{r}, \quad r \neq R \quad (\text{B.3})$$

dove \hat{r} è il versore che indica la direzione radiale.

Segue che:

- Il campo di gravità all'interno di una buccia sferica ($r < R$) di materia è nullo. (*Primo teorema*).
- Un guscio sferico di massa M , avente densità uniforme, esercita su una particella posta all'esterno ($r > R$), una forza gravitazionale pari a quella di una particella puntiforme di massa M posta nel suo centro. (*Secondo teorema*). [17]

Bibliografia

- [1] Paola Focardi. *L'uomo e il cosmo*. 2019.
- [2] Daniele Gasparri. *Galassie*. 2010.
- [3] E.P. Hubble. *The Realm of the Nebulae*. Yale University Press, 1936.
- [4] Stefano Zibetti et al. “Insights into formation scenarios of massive early-type galaxies from spatially resolved stellar population analysis in CALIFA”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (2019).
- [5] J. Major L. Frattare e K. Arcand. *M74 Galaxy*. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/news/nasas-chandra-webb-combine-for-arresting-views.html.
- [6] *Edge on view of the Milky Way with several structures indicated*. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Disco_sottile.
- [7] H. Oja M. Poutanen K. J. Donner. H. Karttunen P. Kroger. *Fundamental Astronomy*. Springer, 2017.
- [8] G. de Vaucouleurs. “Classification and Morphology of External Galaxies”. In: *Astrophysik IV: Sternsysteme / Astrophysics IV: Stellar Systems*. Springer Berlin Heidelberg, 1959.
- [9] Prof. D. Dalla Casa. *Dispense di Processi di radiazione e MHD*. 2022-2023.
- [10] G. de Vaucouleurs e M. Capaccioli. “Luminosity distribution in galaxies. I. The elliptical galaxy NGC 3379 as a luminosity distribution standard.” In: *The Astrophysical Journal Supplement Series* (1979).
- [11] M. Djorgovski S. Davis. “Fundamental Properties of Elliptical Galaxies”. In: *The Astrophysical Journal* (1987).
- [12] K.C. Freeman. “On the Disks of Spiral and S0 Galaxies”. In: *The Astrophysical Journal* (1970).
- [13] Kambiz Fathi. “Revisiting the Scale Length-0 Plane and the Freeman Law in the Local Universe”. In: *The Astrophysical Journal Letters* (2010).
- [14] Eric Emsellem et al. “Fast and slow rotators: the build-up of the red sequence”. In: *Proceedings of the International Astronomical Union* (2007).
- [15] V. C. Rubin, Jr. Ford W. K. e N. Thonnard. “Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV. Systematic dynamical properties, Sa - Sc.” In: *The Astrophysical Journal* (1978).
- [16] Davide Castelvetti. “Euclid launch: dark-energy mapper poised to probe cosmic mysteries”. In: *Nature* (2023).
- [17] Luca Ciotti. *Introduction to Stellar Dynamics*. Cambridge University Press, 2021.

- [18] Michael Merrifield James Binney. *Galactic Astronomy*. Princeton University Press, 1998.
- [19] Prof. L. Ciotti. *Appunti di Astrofisica Extragalattica*. 2023.