

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:
Elena Marcuzzo

Relatore:
Chiar.mo Prof.
Daniele Dallacasa

Sessione IV
Anno Accademico 2017/2018

Sommario

Questa tesi verte alla classificazione delle galassie.

Dopo una prima introduzione per spiegare da dove nasce il concetto stesso di *galassia* (**sez. 1**), si procede con un'esposizione delle caratteristiche dei tipi galattici a livello di *morfologia*, *fotometria* e *cinematica* (**sez. 2, 3 e 4**, rispettivamente). Sarà chiaro nel corso della trattazione che tutte queste caratteristiche sono spesso legate tra loro per cui, dove possibile, l'esposizione degli argomenti è stata organizzata favorendo la continuità del ragionamento a scapito della suddivisione per campi di studio.

Si è voluto, da ultimo, evidenziare alcuni aspetti qualitativi interessanti della *dinamica stellare* delle galassie (**sez. 5**), nel tentativo di spiegare alcuni fenomeni a cui la cinematica non ha saputo dare una risposta. In questa breve sezione si espone il carattere non collisionale delle galassie e a esso si associa, in particolare, il motivo per cui le galassie ellittiche sono di forma ellissoidale.

Si riportano in **Appendice A** sei immagini raffiguranti diversi esempi di tipi galattici.

Indice

1	Excursus storico	1
2	Caratteristiche morfologiche	2
2.1	Galassie Ellittiche	3
2.2	Galassie Lenticolari	4
2.3	Galassie a Spirale	5
2.4	Galassie Irregolari	6
3	Caratteristiche fotometriche	7
3.1	Galassie Ellittiche	10
3.2	Galassie a Spirale	11
4	Caratteristiche cinematiche	12
4.1	Galassie Ellittiche	12
4.2	Galassie a Spirale	14
5	Cenni di dinamica delle galassie	15
	Appendice A	16
	Bibliografia	17

1 Excursus storico

Quando e in quali termini nasce il concetto di galassia?

È il 1610 quando Galileo Galilei osserva con un cannocchiale astronomico la Via Lattea e riesce a risolvere alcune stelle.

Nel '900, memore dell'esperienza galileiana e munita di migliori strumenti, l'Astronomia approda a uno snodo cruciale: vengono osservate delle nebulose non risolte.

Questi oggetti estesi sono parte della Via Lattea o sono esterni a essa?

Molti uomini di scienza partecipano alla ricerca che permetterà di dare una risposta a questa domanda. Tra gli interventi più significativi si ricordano Messier e Herschel per aver catalogato le nebulose, Parsons per aver notato che a caratterizzarle spesso è una struttura a spirale e, con l'introduzione successiva delle lastre fotografiche nel piano focale, Kapteyn e Shapley per aver studiato la distribuzione degli ammassi globulari e per aver costruito un modello della Via Lattea con due principali caratteristiche:

- dimensioni di $\simeq 100 \text{ kpc}$ (in realtà ha un'estensione di "solo" $\simeq 32 \text{ kpc}$),
- il Sole fuori dal centro galattico (a $\simeq 8 \text{ kpc}$).

Diretta conseguenza di questi studi è il "Great Debate" (1920) sulla dimensione e sulla natura delle nebulose:

- la Scuola di Shapley sostiene fermamente che esse facciano parte della Via Lattea, che in realtà è più estesa di quanto si ritenesse fino a quel momento;
- la Scuola di Curtis, di contro, dice che sono altri universi, assolutamente esterni alla Via Lattea.

È nel 1923 che, con la risoluzione di Andromeda ad opera del telescopio del *Mt. Wilson - California*, si vede la fine di questo dibattito con la "vittoria" di Curtis: Andromeda (M31) è una galassia di dimensioni maggiori della Via Lattea ed è un oggetto esterno. A cavallo tra la fine del '900 e l'inizio del nuovo secolo sono introdotti nell'astronomia osservativa nuovi strumenti e nuove tecniche per migliorare le immagini in output:

- CCDs (in sostituzione delle lastre fotografiche) per migliorare la sensibilità degli strumenti grazie a una risposta lineare e una risoluzione angolare;
- HST (Hubble Space Telescope) per ottenere delle immagini senza aberrazioni dovute all'atmosfera terrestre;
- IFS (Integral Field Spectroscopy) per ottenere spettri spazialmente risolti sfruttando la combinazione di capacità spettrografiche e di imaging.

Ad oggi si contano circa 100 miliardi ($\simeq 10^{11}$) di galassie ¹, ognuna delle quali composta da un numero di stelle che oscilla tra i 10 milioni e i 100 miliardi ($10^7 - 10^{11}$).

¹Si noti che la distribuzione spaziale delle galassie non è uniforme: sono distribuite in gruppi ($\simeq 100$ oggetti) o ammassi ($\simeq 1000$ oggetti).

2 Caratteristiche morfologiche

È E. Hubble a presentare una prima classificazione morfologica delle galassie nel suo libro *The Realm of the Nebulae* (1936): la **Sequenza di Hubble**² (fig.1).

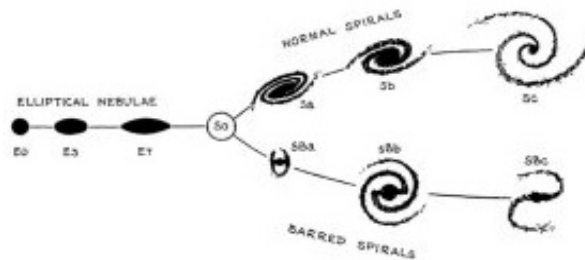


Figura 1: Sequenza di Hubble. Le galassie ellittiche (a sinistra del diagramma) sono classificate in base alla loro apparente ellitticità nel piano del cielo mentre le galassie a spirale (a destra) secondo la prominente dei bracci e la presenza della barra.

Hubble ritiene che le Ellittiche siano di tipo "early", mentre le Spirali di tipo "late": questo presuppone che le seconde siano l'evoluzione naturale delle prime. Studi successivi hanno però affermato che il suo "diapason" (fig. 1) non è da considerarsi come traccia/sequenza evolutiva. Perché?

1. È controintuitivo pensare che sistemi ricchi di gas (galassie "late-type": spirali e irregolari) si originino a partire da sistemi poveri di gas (galassie "early-type": ellittiche e lenticolari).
2. Se, per assurdo, considerassimo il diagramma come una vera e propria traccia evolutiva, ci aspetteremmo di osservare più tipi finali e meno tipi iniziali/intermedi, ma non è così.

Negli anni successivi gli astronomi si concentrano sulla ricerca di altre caratteristiche generali che si ripetono nei diversi tipi morfologici. In questo contesto nasce la **Classificazione di De Vaucouleurs** (fig. 2), utile per una caratterizzazione più specifica delle galassie di tipo "late" poiché considera due fattori aggiuntivi: la presenza di un *anello* e la struttura a *s*.

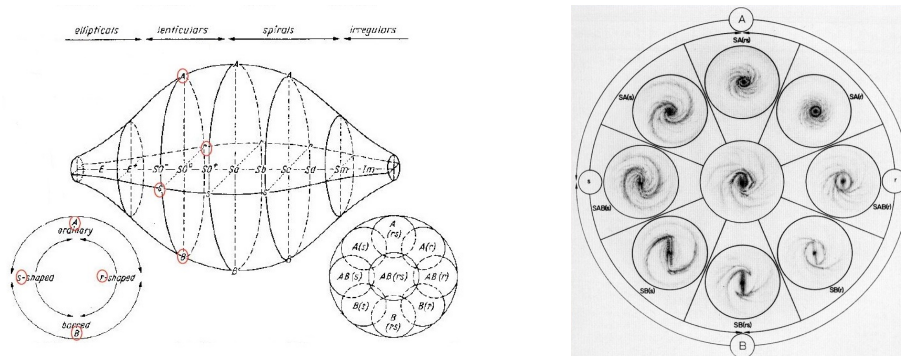


Figura 2: Classificazione di De Vaucouleurs. Nell'immagine a sinistra, andando da sinistra verso destra: Ellittiche, Lenticolari, Spirali e Irregolari. Considerando invece la cross section (immagine accanto), si individuano: in **A**, le galassie normali (non barrate); in **B**, le galassie barrate; in **s**, le galassie che presentano struttura a *s*; in **r**, le galassie che presentano struttura ad anello.

²In fig. 1 è riportato il disegno originale di Hubble, inserito a pg. 45 del suo volume.

Con la classificazione di De Vaucouleurs risulta possibile definire anche dei *tipi intermedi* e questo rende più precisa l'identificazione delle galassie osservate: la Via Lattea, per esempio, è una SBbc ³.

A conclusione della presentazione di queste due classificazioni basate sulle osservazioni, si noti che un grande limite di entrambe è la *soggettività*⁴ del metodo. A causa dell'assenza di parametri oggettivi, i tentativi di classificare una certa galassia in esame si portano dietro il potere del punto di vista. Queste classificazioni sono costruite su osservazioni in banda blu (450 – 475 nm \simeq 4500 – 4750 Å) e si applicano con tanta più facilità quanto più la galassia studiata è grande (galassie *giganti* o *supergiganti*) perchè aumenta la risoluzione delle componenti galattiche.

Le immagini dei tipi galattici sono riportate in Appendice A, pg. 16.

2.1 Galassie Ellittiche

Di tipo "early", le galassie ellittiche sono galassie *rosse* e quindi presentano una popolazione stellare vecchia (stelle M/K di età ≥ 5 Gyr, pop. II). Sono caratterizzate dall'assenza di gas freddo⁵ e quindi non ci sono zone di formazione stellare. In genere solo le ellittiche più massicce contengono gas caldo ($T \simeq 10^7-8$ K). Le masse e le luminosità di questo tipo morfologico occupano un range relativamente vasto di valori:

- ellittiche *dE* (nane): $M \geq 10^5 M_\odot$, $L_B < 10^9 L_{B_\odot}$
- ellittiche *ETG* (normali): M copre un ampio range di valori perché questa categoria di galassie considera anche le *gE* (giganti) e le *cE* (compatte) , a patto che valga $10^9 L_{B_\odot} < L_B < 10^{11} L_{B_\odot}$
- ellittiche *cD* (super-giganti, alone esteso): M arriva ad assumere valori dell'ordine di $10^{12-13} M_\odot$, $L_B > 10^{11} L_{B_\odot}$

In sez. 2 (pg. 2) si è già specificato che le galassie ellittiche occupano la parte sinistra della Sequenza di Hubble (fig. 1) e sono classificate in base alla loro apparente ellitticità nel piano del cielo: cominciando dalle E0 che sono *round-shaped* si arriva, con le E7, a un'ellitticità pronunciata. Ma come si calcola la classe morfologica? Considerando che la lettera *E* sta per "galassia ellittica", si pone l'attenzione sui numeri che la affiancano. L'*ellitticità* si calcola secondo la seguente formula:

$$\epsilon = 1 - \frac{b}{a} \tag{1}$$

dove a è l'asse maggiore dell'ellisse e b l'asse minore.

A questo punto, i numeri da 0 a 7 sono ottenuti dalla relazione generalizzata $N = 10 \cdot \epsilon$. Si noti che E7 è considerato, ad oggi, un limite superiore di ellitticità e questo significa che non sono mai stati osservati (e probabilmente non esistono) oggetti più schiacciati di E7. L'ellitticità cui si sta facendo riferimento è però quella apparente che dipende dall'angolo con cui una galassia viene osservata. Dunque, il fatto che non siano stati osservati oggetti più schiacciati di E7 è da attribuirsi a *effetti di proiezione* che hanno la caratteristica di far apparire gli oggetti più "tondi" di quello che sono in realtà.

³Spirale Barrata di tipo intermedio tra il b e il c.

⁴A parziale "dimostrazione" del carattere soggettivo di questi criteri si può pensare, per esempio, al fatto che sussiste una forte relazione tra la banda in cui si decide di osservare e l'immagine osservata (della struttura della galassia in esame).

⁵Solo una netta minoranza di galassie ellittiche presenta gas freddo che, però, risulta essere accresciuto dall'esterno e per questo si può dire che *non* è una caratteristica intrinseca delle ellittiche.

La distribuzione della geometria apparente (2-D, nel piano del cielo) delle galassie ellittiche è da ritenersi consistente con le aspettative: *tipi tondeggianti si osservano più frequentemente per via dell'inclinazione rispetto al piano del cielo.*

Ben diversa è la questione della *forma tridimensionale intrinseca*. Le possibili configurazioni degli assi dell'ellissoide che rappresenta una galassia ellittica sono tre: si veda fig. 3.

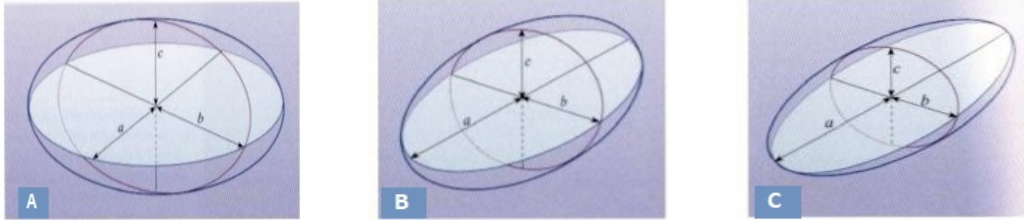


Figura 3: Modelli 3-D galassie ellittiche. In A, *ellissoide oblato* (2 semiassi uguali e 1 minore); in B, *ellissoide prolato* (2 semiassi uguali e 1 maggiore); in C, *ellissoide triassiale* (3 semiassi diversi).

Per determinare la distribuzione di massa 3-D esistono due approcci

1. APPROCCIO STATISTICO: si inizia dando per scontata l'esistenza di una certa distribuzione intrinseca di ellitticità in cielo dato un tot. numero di ellissoidi e si confronta il modello ipotizzato con le osservazioni, determinando se è consistente o meno;
2. APPROCCIO NON STATISTICO: si associano all'approccio statistico le informazioni cinetiche⁶. Si ottiene un modello di dati fotometrici grazie al quale è possibile risalire all'angolo di inclinazione lungo la linea di vista (*L.O.S.*).

La conclusione trovata è che *la maggior parte delle galassie ellittiche sono debolmente triassiali (quasi oblate), con rapporto $a : b : c = 1 : 0.95 : 0.65$.*

Ma come siamo certi dell'effettiva presenza di un rapporto triassiale intrinseco?

Malgrado non esistano evidenze dirette a causa della forte dipendenza dall'inclinazione con cui si osserva l'oggetto, esistono comunque *evidenze indirette*. Si riporta in questo testo il fenomeno più significativo⁷ a supporto di quest'ipotesi: il *twist delle isofote*⁸.

2.2 Galassie Lenticolari

Sono galassie "early-type" che presentano un disco senza bracci in rotazione attorno a uno sferoide centrale. Le lenticolari sono classificate principalmente in base a due fattori:

- prominenza della barra: da SB0 a SB03;
- presenza di polveri: da S01 (niente) a S03 (tracce).

⁶I dati utilizzati devono essere tali da garantire stabilità e dinamicità tipiche delle galassie.

⁷Ci si potrebbe affidare, per esempio, anche allo studio della distribuzione della polvere (per quanto presente in quantità ridotta) e del gas (che è a temperature tali da risultare ionizzato) ma in questo caso sarebbe necessario tenere in conto gli effetti della buca di potenziale che caratterizza la galassia in esame.

⁸Si veda sez. 3.1 pg. 10.

Le $S0/a$ sono lo snodo, nella sequenza di Hubble (fig. 1), tra le Ellittiche e le Spirali:

- come le galassie ellittiche contengono poco gas freddo, non mostrano una struttura a spirale e non hanno avuto recente formazione stellare;
- come le galassie a spirale hanno un disco di stelle in rotazione attorno a uno sferoide centrale (bulge) e possono presentare una barra, ma i bracci sono assenti.

Dalle osservazioni è noto che la distribuzione delle lenticolari è concentrata nelle zone di alta densità degli ammassi di galassie. Per questo e per i tratti simili a quelli delle galassie a spirale si ipotizza che le $S0$ siano in realtà galassie a spirale cui è stato portato via il gas interstellare a causa delle frequenti interazioni con il gas caldo ($\simeq 10^{7-8} K$) dell'ammasso di galassie.

2.3 Galassie a Spirale

Le galassie a spirale fanno parte delle "late-type" e, a differenza delle ellittiche, presentano gas multifase: *cold*, $T = 10 - 100 K$; *warm* (neutro), $T = 100 - 10^3 K$; *warm* (ionizzato), $T \simeq 10^4 K$; *hot*, $T \simeq 10^{6-7} K$. Zone in cui si riscontrano alte densità di gas freddo spesso sono regioni di formazione stellare, per cui la popolazione stellare delle spirali è più giovane (stelle O/M, pop. I e II) rispetto a quella delle ellittiche.

Si trovano nella parte destra della sequenza di Hubble (fig. 1), divise in due rami: il ramo più in alto per le spirali non barrate, quello più in basso per le barrate. Le principali componenti di questa categoria di galassie sono:

- BULGE \rightarrow Componente *hot* (moti random, sez. 4) molto simile, strutturalmente, alle galassie ellittiche. La densità stellare è alta. È presente inoltre un gradiente di metallicità per cui al centro l'abbondanza di metalli è maggiore di quella solare mentre va diminuendo verso l'esterno.
- DISCO SOTTILE \rightarrow Componente *cold* (moti ordinati, sez. 4). Prevalenza di stelle giovani e dunque presenza di regioni di formazione stellare (SFR).
- DISCO SPESSO \rightarrow Componente *hot/cold*. Le stelle che compongono il disco spesso sono più vecchie e la loro velocità di rotazione attorno al centro galattico è minore rispetto a quella del disco sottile.
- ALONE \rightarrow Componente prevalentemente *hot*. Presenta una bassa densità stellare che corrisponde solo a una piccola percentuale della luminosità totale. La rotazione è quasi nulla. Le stelle sono vecchie e possono essere distribuite in modo sparso ma anche in ammassi globulari. A riprova del già citato gradiente di metallicità, le stelle dell'alone sono povere di metalli perché lontane dal centro galattico.
- BARRA \rightarrow Circa il 50 % delle galassie a spirale presenta una barra, ovvero un oggetto materiale formato da stelle (prevalentemente vecchie) e gas che ruotano con il disco (alla stessa velocità).

Diversa è la questione per i BRACCI: non sono oggetti materiali e non possono dunque essere definiti vere e proprie componenti di una galassia a spirale. Inizialmente si pensava che il disegno dei bracci si formasse a causa della rotazione differenziale del disco, in realtà però con gli esperimenti numerici è stato presto chiaro che, se questa ipotesi fosse verificata, i bracci sarebbero avvolti su se stessi in tempi brevi; considerato che il disegno dei bracci è ben definito e stazionario, è necessario vagliare

altre ipotesi. È su questa lunghezza d'onda che si arriva alla conclusione: il disegno è una sovrapposizione della rotazione differenziale del disco, per cui il materiale viaggia a una certa velocità (costante, fissata la distanza dal centro galattico), e di un'onda di densità che si propaga ruotando attorno all'asse di simmetria del disco. Essendo la velocità di propagazione dell'onda minore rispetto alla velocità di rotazione del disco, il materiale di quest'ultimo entra nella cresta dell'onda e si verifica così il contrasto di densità che è il disegno dei bracci. Dopo aver raggiunto l'onda, le stelle passano oltre e continuano la loro normale rotazione. In questo senso i bracci non sono oggetti materiali: a differenza della barra (che ruota in quanto formata sempre dalle stesse stelle che ruotano), i bracci non ruotano perchè sono semplicemente un contrasto di densità al cui interno il materiale è soggetto a un continuo ricambio. A proposito dei bracci e della loro orientazione, le spirali sono divise in due grandi categorie: *trailing* e *leading* (fig. 4).



Figura 4: Spirali trailing e leading

Le galassie a spirale si classificano inoltre secondo due caratteristiche primarie

- prominente del bulge rispetto al disco (in termini di luce): dalle S0 alle Sc, il disco domina sempre di più sul bulge
- livello di avvolgimento dei bracci (valido anche per le barrate): dalle Sa alle Sc l'angolo⁹ aumenta sistematicamente fino a $\simeq 30^\circ$

e due secondarie

- risoluzione del disco in stelle e regioni HII: le Sa hanno bracci poco risolti caratterizzati da una forma continua e regolare, le Sc hanno bracci molto risolti e appaiono frastagliati (SFR, stelle giovani e filamenti di polvere)
- prominente (in termini di densità) dei bracci: dalle Sa alle Sc il contrasto di densità va aumentando

2.4 Galassie Irregolari

Le galassie irregolari ("late") presentano stelle giovani (prevalentemente di pop. I) e questo si deve alle grandi quantità di polvere e gas che le caratterizzano.

Si suddividono¹⁰ in:

- Irr I - tipo I (Im), non barrate;
- Irr II - tipo II (IBm), barrate.

La "m" in questa nomenclatura sta a indicare che sono di tipo *magellano*¹¹.

Le *Irr I* sono caratterizzate da una struttura debolmente regolare, mentre le *Irr II* non presentano alcuna regolarità nella struttura.

⁹Si fa riferimento all'angolo tra la tangente alla circonferenza che delimita il bulge e la tangente al braccio nello stesso punto.

¹⁰Questa classificazione è stata aggiunta successivamente da Hubble, come continuazione dei due rami del diapason in fig. 1 pg.2.

¹¹Le *Nubi di Magellano* sono due galassie satellite irregolari molto piccole in orbita attorno alla Via Lattea che devono il nome a Ferdinando Magellano (navigatore che per primo ha descritto questi oggetti raccontando una delle sue spedizioni). È possibile distinguere una *LMC* (Large Magellanic Cloud) e una *SMC* (Small Magellanic Cloud), situate rispettivamente a 48kpc e 61kpc dalla nostra galassia.

3 Caratteristiche fotometriche

La *fotometria* delle galassie si pone come fine ultimo quello di determinare, per ogni tipo morfologico, il **profilo di brillantezza**¹² delle galassie. La distribuzione delle stelle crea, in proiezione, un profilo di luce: con la fotometria si riescono dunque a ricavare informazioni sulla distribuzione interna 3-D delle stelle.

Per arrivare al profilo di brillantezza, si definisce la *brillantezza superficiale*:

- BRILLANZA SUPERFICIALE IN UNITÀ LINEARI

$$I = \frac{F}{\Omega} = \frac{L}{4\pi A} \quad \left[\frac{\text{erg}}{\text{s cm}^2} \right] \quad (2)$$

dove F è il *flusso* ($\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$), Ω è l'*unità di angolo solido* (adimensionale), L è la *luminosità* (erg s^{-1}) e A è l'*area della sorgente proiettata dall'angolo solido*. La seconda uguaglianza¹³ dell'eq.ne 2 tacitamente afferma che *la brillantezza, nell'universo locale, non dipende dalla distanza*.

- BRILLANZA SUPERFICIALE IN MAGNITUDINI

$$\mu = -2.5 \text{ Log}I + \text{cost} \quad \left[\frac{\text{mag}}{\text{arcsec}^2} \right] \quad (3)$$

Dalle formule precedenti si può notare la facilità nel calcolo della brillantezza superficiale di un oggetto: il risultato così ottenuto è però un valore globale.

In questa sezione si procede con un'analisi più dettagliata della fotometria delle galassie attraverso lo studio dei profili di brillantezza. Per fare questo si ricorre alla **Legge di Sersic** riportata di seguito in modi diversi ma tutti equivalenti:

$$I(R) = I_0 \cdot 10^{-b'_n \left(\frac{R}{R_e}\right)^{\frac{1}{n}}} = I_0 \cdot e^{-b_n \left(\frac{R}{R_e}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (4)$$

$$I(R) = I_e \cdot 10^{-b'_n \left[\left(\frac{R}{R_e}\right)^{\frac{1}{n}} - 1\right]} = I_e \cdot e^{-b_n \left[\left(\frac{R}{R_e}\right)^{\frac{1}{n}} - 1\right]} \quad (5)$$

dove $I(R)$ è il *profilo di brillantezza*, I_0 è la *brillantezza al centro*, I_e è la *brillantezza al raggio effettivo*, R è il *raggio*, R_e è il *raggio effettivo*¹⁴, n è l'*indice di Sersic* (parametro libero che permette di variare la forma del profilo), b_n e b'_n sono due coefficienti da determinarsi, in base al valore di n , affinché R_e mantenga la sua definizione (relazioni approssimate: $b'_n = 0.87n - 0.14$, $b_n = 2n - 0.327$).

Una volta trovato $I(R)$, è possibile inoltre determinare la *luminosità totale* (L_T) con

$$L_T = 2\pi \int_0^\infty I(R) R dR \quad (6)$$

Per esprimere la legge di Sersic in magnitudini, si procede considerando le prime due uguaglianze delle eq.ni 4 e 5 e l'espressione della brillantezza superficiale in magnitudini (eq.ne 3).

¹²Il profilo di brillantezza è l'*andamento radiale della luce*, in corrispondenza biunivoca con l'*andamento radiale della massa stellare*.

¹³Quest'uguaglianza deriva dal seguente modo di esprimere il flusso e l'angolo solido: $F = \frac{L}{4\pi D^2}$; $\Omega = \frac{A}{D^2}$. D è la *distanza* della sorgente.

¹⁴Il raggio effettivo è una grandezza conveniente per dare una prima stima delle dimensioni di una galassia e corrisponde al raggio (proiettato sul piano del cielo) che racchiude *metà* della luce totale. Si assume che R_e e μ_e valgano rispettivamente 10 *kpc* e 25 $\frac{\text{mag}}{\text{arcsec}^2}$.

Si ottengono

$$\mu(R) = \mu_0 + 2.5 b'_n \left(\frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4')$$

e

$$\mu(R) = \mu_e + 2.5 b'_n \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \quad (5')$$

dalle quali segue una semplice relazione tra la brillantezza in magnitudini al centro e quella al raggio effettivo: $\mu_0 = \mu_e - 2.5 b'_n$.

La legge di Sersic è una *generalizzazione* della più specifica e precedente **legge di De Vaucouleurs** che ne è la sua esatta rappresentazione per $n = 4$:

$$I(R) = I_e \cdot 10^{-3.33 \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right]} = I_e \cdot e^{-7.67 \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \right]} \quad (7)$$

Si fa presente che l'espressione di I(R) appena scritta è in funzione di I_e ma, come nel caso Sersic (eq.ni 4 e 5), è possibile sostituire I_0 a I_e operando le dovute trasformazioni sull'esponente.

Proponendo questa formula per il profilo di brillantezza, De Vaucouleurs crede che esso rappresenti tutte le galassie in modo esatto entro i margini d'errore. Questo risulta essere però una sorta di effetto di selezione: il valor medio di n è 4 e questo è il risultato del fatto che $n \simeq 2$ nel caso di galassie poco luminose e $n \simeq 6$ per le galassie molto luminose.

Si noti che, prima dell'avvento della legge di Sersic, la legge di De Vaucouleurs descriveva il profilo di luce degli sferoidi (galassie ellittiche e bulge delle galassie a spirale); il profilo del disco delle galassie a spirale era invece descritto dalla **legge del disco** (eq.ne 8).

$$I(R) = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{R_d}} \quad (8)$$

R_d è definito raggio centrale o *raggio di scala del disco*.

È possibile esprimere la legge del disco in termini di R_e (in sostituzione di R_d) ed è stato dimostrato che, con questa operazione, l'eq.ne 8 si riduce a essere un caso specifico ($n = 1$) della legge di Sersic, come per il caso della De Vaucouleurs ($n = 4$):

$$I(R) = I_0 \cdot e^{-b_1 \frac{R}{R_e}} = I_0 \cdot 10^{-b'_1 \frac{R}{R_e}} \quad (8')$$

La legge del disco si applica correttamente solo se l'angolo con cui si osserva il disco è 0° (face-on).

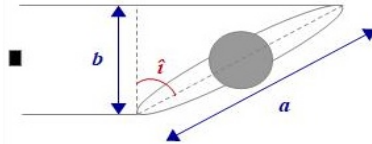


Figura 5: **Inclinazione rispetto all'osservatore.** Il quadrato nero rappresenta l'osservatore; \hat{i} è l'angolo di inclinazione, a è il diametro del disco e b è il diametro proiettato. Determinare a e b è sempre possibile e, noti questi due valori si ricava l'inclinazione con $\cos(\hat{i}) = \frac{b}{a}$. Se $\hat{i} = 0^\circ$ allora $b=a$, se Se $\hat{i} = 90^\circ$ allora $b=0$.

Ricapitolando, la legge di Sersic descrive tutti i tipi morfologici a seconda del valore del parametro n (fig. 6).

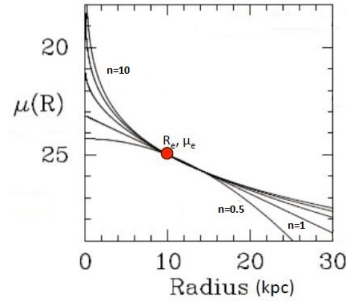


Figura 6: Profilo di Sersic per diversi valori di n . Per $1.5 < n < 10$ profilo di luce galassie ellittiche; per $n=1$ disco delle spirali; per $0.5 < n < 4$ bulge delle spirali.

Sette anni dopo la pubblicazione della legge di Sersic, Freeman espone nel 1970 la **Legge di Freeman**, secondo la quale la brillantezza superficiale centrale dei dischi cadrebbe sempre in un intorno di valori centrato attorno a un valore costante $\mu_{0,B}$ tale che, per ogni disco, $\mu_B = [21.65 \pm 0.30] \frac{mag}{arcsec^2}$.

È stato dimostrato anche questa volta, come nel caso della legge di De Vaucouleurs, che si tratta di un effetto di selezione: all'inizio degli studi sulle galassie erano state prese in considerazione solo quelle più brillanti e più grandi (per la maggiore facilità con cui si distinguevano le loro proprietà). Il problema di questa legge sta proprio nel non aver considerato gli oggetti con magnitudine maggiore e dunque più deboli (*LSB*).

Da ultimo, prima di passare alla descrizione più specifica della fotometria delle galassie ellittiche e a spirale, si ritiene necessario chiarire meglio il concetto di *raggio* visto che è stato ripreso più volte in questa sezione (*r. centrale, r. effettivo, r. di scala, R come variabile di I(R)*). Presa una sorgente estesa, per poter procedere con lo studio dei profili di luce (andamento radiale) è stato necessario individuare in essa delle linee su cui la brillantezza rimane costante. Queste linee chiuse sono le *isofote* (fig. 7) e, se queste sono circolari, il raggio di cui sopra è il *raggio dell'isofota*.

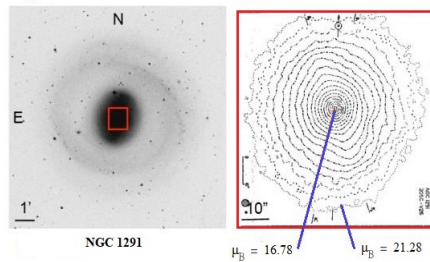


Figura 7: **Isfote - NGC 1291**. Al centro la magnitudine in banda B (μ_B) è minore rispetto a quella esterna: la brillantezza al centro è dunque maggiore di quella esterna, perchè le magnitudini "vanno al contrario".

Nel caso delle galassie ellittiche, le isofote sono interpolate da ellissi¹⁵ (es. *NGC 1291* fig. 7). Cosa intendiamo dunque con raggio dell'isofota?

Un'ellisse è descritto da due assi, uno maggiore (a) e uno minore (b): si può interpretare il concetto di raggio solo come *raggio circolarizzato*¹⁶ ($R = \sqrt{ab}$).

¹⁵I profili di brillantezza e, di conseguenza, le isofote, sono strettamente legati alla distribuzione di massa stellare: se quest'ultima è costante su ellipsoidi, anche la luce lo sarà.

¹⁶L'area generata dal raggio circolarizzato è $\pi R^2 = \pi ab$, ovvero uguale all'area generata dall'ellisse di partenza.

3.1 Galassie Ellittiche

Le isofote ellittiche sono soggette a un effetto chiamato *twist delle isofote*¹⁷ (fig. 8): si parla di una variazione dell'angolo di posizione dell'isofota con la distanza dal centro.

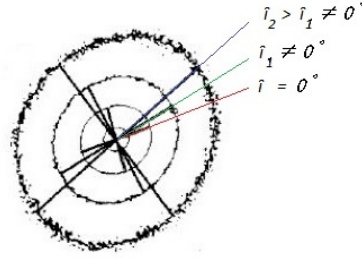


Figura 8: **Twist delle isofote.** Se ci si concentra su un'isofota interna e si stabilisce che il suo semiasse maggiore avrà un'inclinazione $\hat{i} = 0^\circ$ rispetto a un punto zero arbitrario, si noterà che i semiasse maggiori delle isofote più esterne avranno un'inclinazione diversa rispetto al punto zero considerato.

Questo fenomeno porta con sé una rotazione degli ellissoidi interni e, a causa di questa rotazione, l'ellissoide triassiale non risulta più come "visto da uno dei suoi lati" perché cambiano i rapporti tra gli assi. Noto \hat{i} è dunque possibile risalire al rapporto triassiale intrinseco delle galassie ellittiche sfruttando la simmetria rotazionale tra gli assi.

Il profilo di brillantezza si calcola con la legge di Sersic per le ellittiche ($1.5 < n < 10$).

Proseguendo con la fotometria delle galassie ellittiche si riportano di seguito delle correlazioni (non sempre esatte) tra grandezze fotometriche e morfologiche:

- $L_T \sim R_e$ (**Legge di Scala**, correlazione): oggetti *più brillanti* hanno un raggio effettivo *maggiore*.
- $L_T \sim I_e$ (anticorrelazione): oggetti *più brillanti* sono quelli *meno luminosi* al centro (entro il raggio effettivo).
- $R_e \sim \langle I_e \rangle^{-0.8}$ (**Relazione di Kormendy**, anticorrelazione): oggetti *più luminosi* al centro (entro il raggio effettivo) hanno raggi effettivi *minori*.
- $L_T \sim \text{densità 3-D delle stelle}$ (correlazione)¹⁸: la *proiezione* della densità stellare fornisce la densità superficiale di massa e, di conseguenza, il profilo di brillantezza, mentre la *deproiezione* della brillantezza dà la densità 3-D di stelle.
- $L_T \sim M_{BH}$ (correlazione): per oggetti *più brillanti* è *maggiore* la massa del buco nero centrale.

¹⁷Già citato in sez. 2.1, il twist delle isofote viene qui sviluppato come caratteristica fotometrica per spiegare perché sia considerato una prova della triassialità delle galassie ellittiche.

¹⁸È possibile, a dimostrazione di questa correlazione, ricavare le leggi di proiezione e deproiezione, per poi applicarle, rispettivamente, alla densità stellare per ottenere il profilo di brillantezza, e al profilo di brillantezza per ottenere la densità stellare. L'applicazione di queste formule non risulta essere sempre agevole: in generale, per dimostrare quanto detto, si usa infatti il *profilo di Hubble modificato*, associato allo studio degli ammassi globulari.

3.2 Galassie a Spirale

Le componenti principali delle galassie a spirale sono due: uno sferoide centrale e un disco. Essendo il disco la componente più estesa, secondo quanto detto in sez. 3, inizialmente si pensava che fosse sufficiente la legge del disco (o legge di Sersic con $n = 1$) per determinare il profilo di luce. Comparando però il risultato ottenuto "teoricamente" con le osservazioni è apparsa subito chiara la necessità di giustificare l'eccesso di brillantezza al centro: *il profilo di brillantezza delle galassie a spirale è il risultato di una sovrapposizione tra due leggi di Sersic, una con $n = 1$ (disco) e una con $0.5 < n < 4$ (sferoide).*

La legge di Sersic per gli sferoidi si applica "normalmente", mentre quella per il disco implica due precisazioni:

- DISCO EDGE-ON: se si osserva il disco perfettamente di taglio, sopra e sotto il disco è possibile misurare l'andamento della sua *brillantezza superficiale* in funzione dell'altezza rispetto al piano individuato dal disco.

$$I(R', z) = I'(R') \cdot e^{-\frac{|z|}{h_z}} \quad (9)$$

dove R' è la *distanza dal centro della galassia lungo il piano equatoriale*, z è l'*altezza rispetto al piano equatoriale*, $I'(R')$ è la *brillantezza del disco edge-on* e h_z è un parametro che vale $\sim [0.1 - 1]kpc$ ¹⁹.

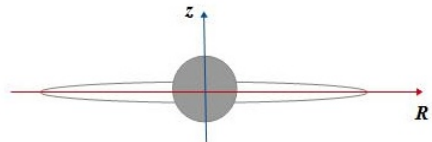


Figura 9: Disco edge-on.

- CUT-OFF: esiste un *raggio massimo*²⁰ dell'ordine di $3 - 5 R_d$ in cui la distribuzione diventa più ripida rispetto alla legge esponenziale di disco. Il cut-off è una particolarità intrinseca delle distribuzioni di stelle.

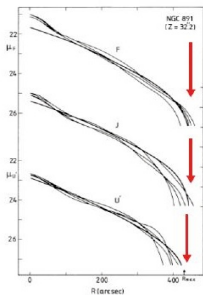


Figura 9.1: **Cut-off del profilo di brillantezza del disco.** Irrigidimento della distribuzione a grossi raggi. I profili di brillantezza sono sempre del tipo legge del disco ma i raggi di scala (R_d) sono diversi per ogni valore di λ (lunghezza d'onda/banda d'osservazione) perchè la distribuzione della popolazione stellare non è omogenea dal centro verso l'esterno. In figura, l'esempio della galassia NGC 981 (galassia a spirale di tipo Sb).

¹⁹ h_z assume questi valori poichè $h_z \sim 0.1R_d$: come già visto in sez. 3, R_d è il raggio di scala del disco e assume valori che possono oscillare tra $1kpc$ (disco sottile) e $10kpc$ (disco spesso).

²⁰Si noti che le regioni di HI si estendono ben oltre i confini visibili del disco, arrivando fino a circa $2R_{max}$.

4 Caratteristiche cinematiche

Studiare la *cinematica*²¹ di una galassia significa fundamentalmente analizzare il movimento delle stelle che la compongono per ottenere informazioni sul tipo morfologico e, dunque, sulla struttura, sull'età e sull'evoluzione della galassia.

Sono 4 le grandezze fondamentali che caratterizzano questa disciplina: posizione, velocità, accelerazione e tempo. Tutto si propaga in un continuo 4-D (x, y, z, t) : è *inutile determinare la posizione di un oggetto senza precisare il tempo a cui essa corrisponde e viceversa*.

Questo testo si concentra sulla descrizione in parallelo (per quanto possibile) delle caratteristiche cinematiche delle galassie ellittiche (sez. 4.1) prima, a spirale (sez. 4.2) poi, grazie anche all'introduzione del concetto di *spettroscopia*²².

Ogni stella possiede un'energia meccanica totale data dalla somma di *energia cinetica* ed *energia potenziale*: $E = T + U$. L'energia potenziale è generata dalla galassia (buca di potenziale), ma come si genera invece l'energia cinetica che la contrasta?

4.1 Galassie Ellittiche

Nelle galassie ellittiche le stelle non cadono nella buca di potenziale grazie all'energia cinetica generata dai *moti random* delle stelle stesse: le orbite coprono tutto il volume e non seguono una direzione privilegiata.

Questo è conseguenza diretta dell'origine dei tipi morfologici. Una galassia si forma a partire da una nube protogalattica di gas. Inizialmente non c'è presenza di stelle, poi le strade possibili sono due: una per lo sferoide (galassie ellittiche e bulge delle spirali) e una per il disco (galassie a spirale). Nel caso specifico delle Ellittiche, la *SF* (formazione stellare) avviene in tempi *più rapidi* del collasso della nube: l'oggetto finale risulta essere di forma sferoidale e le stelle assumono moti disordinati perchè ognuna mantiene la propria traiettoria e la propria velocità. Come si può vedere in fig. 10, $\frac{v}{\sigma} < 1$ perchè i moti random descritti dalla *dispersione di velocità* σ dominano sui *moti ordinati di rotazione* v .

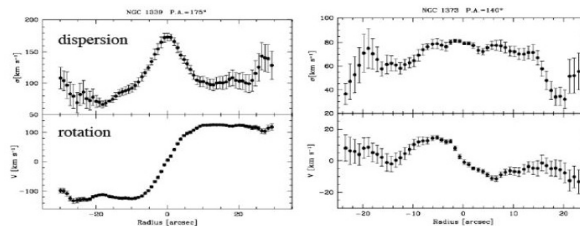


Figura 10: Velocità di rotazione e dispersione delle galassie ellittiche. A sinistra NGC 1339 (ellittica), a destra NGC 1373 (ellittica). Le immagini superiori rappresentano la dispersione di velocità σ in funzione del raggio, quelle inferiori la velocità di rotazione v in funzione del raggio.

²¹La cinematica è un ramo della meccanica che si prefigge come obiettivo la descrizione del moto di un oggetto (punto materiale, corpo continuo o corpo rigido) senza considerare le forze responsabili di tale movimento. Comunque, per quanto in modo diverso, anche le forze generatrici del moto hanno notevole rilevanza: la disciplina che si occupa di considerarle è la dinamica (accenni in sez. 5).

²²L'analisi degli spettri fa parte della *fotometria*. Per una descrizione più completa dell'argomento però è d'uopo considerare anche le relazioni che sussistono tra la spettroscopia e la cinematica, cosa che si può fare in sez. 4 ma che non si sarebbe potuta fare in sez. 3 per mancanza di riferimenti alle caratteristiche cinematiche.

La dispersione di velocità mostra due importanti correlazioni:

- $L_T \sim \sigma^4$ (**Relazione di Faber-Jackson**, correlazione): oggetti descritti da una dispersione di velocità *maggiore* sono *più brillanti*.
- $Mg_2 \sim \sigma_0$ (correlazione): oggetti descritti da una dispersione di velocità *maggiore* presentano, nello spettro, una riga in assorbimento del magnesio *più marcata*.

Lo *spettro integrato* presenta righe *più allargate* dello spettro stellare (evidente in fig. 11). Per sua definizione, lo spettro integrato risulta essere una sovrapposizione di moti stellari lungo la linea di vista e la riga allargata corrisponde al range di frequenze (o lunghezze d'onda, nel caso in figura) che comprende tutti i valori associati alle velocità delle stelle (sempre lungo la direzione che si sta considerando).

Secondo quanto appena detto, dall'allargamento della riga è possibile dedurre la dispersione di velocità σ . Ma, si noti, l'allargamento può essere interpretato anche come un deficit di flusso e quest'ultimo è legato all'*abbondanza* di metalli²³ perchè una maggiore presenza di metalli causa un maggiore assorbimento. È così dimostrata la relazione $Mg_2 \sim \sigma_0$. Mg_2 è un *indicatore di metallicità* e si misura in *mag* (corrisponde al deficit di flusso, esprimibile in magnitudini).



Figura 11: **Spettroscopia galassie**. Immagine a sinistra: in alto, lo spettro $I(\lambda)$ di una generica stella tipicamente appartenente alle galassie ellittiche; in basso, lo spettro di una generica galassia ellittica, detto anche spettro integrato. Immagine a destra: in figura è rappresentata la velocità di rotazione (km/s , in ascissa) in funzione del raggio ($arcsec$, in ordinata).

Esaurita l'analisi qualitativa della dispersione di velocità, si può passare a questo punto a fare delle considerazioni sulla componente di velocità rotazionale.

Ogni elemento chimico è associato a una lunghezza d'onda ben precisa (λ_{em}). In presenza di moti random si hanno direzioni casuali e su grandi numeri la velocità effettiva tende a zero perchè i contributi si compensano e si annullano a vicenda: *la riga dell'elemento considerato avrà la stessa lunghezza d'onda centrale ($\lambda_0 = \lambda_{em}$) ma risulterà essere più larga*. La velocità sistematica di rotazione è invece il risultato di tanti contributi che vanno tendenzialmente nella stessa direzione e nello stesso verso generando una velocità sistematica totale diversa da zero: *la riga dell'elemento considerato manterrà il suo allargamento caratteristico ma presenterà una diversa lunghezza d'onda centrale ($\lambda_0 = \lambda_{oss} \neq \lambda_{em}$)*.

L'utilità della spettroscopia sta quindi nel fatto che, misurando lo spostamento rispetto alla frequenza reale (nota) dell'elemento considerato, è possibile ricavare la velocità sistematica di streaming. Ovviamente l'effetto mostrato in fig. 11 (immagine destra) è più rilevante nelle galassie a spirale per la maggior v_{rot} .

²³La *presenza* di metalli è invece accertata dall'esistenza della riga.

4.2 Galassie a Spirale

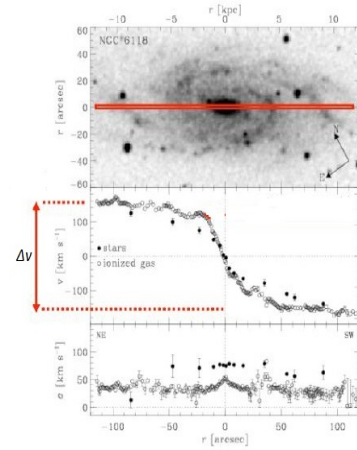
Nel caso delle galassie a spirale, a proposito di come le stelle si sostengono nella buca di potenziale, si fa una distinzione tra le componenti:

- nel bulge l'energia cinetica deriva dai *moti random* delle stelle;
- nel disco l'energia cinetica è dovuta ai *moti ordinati* (streaming) di rotazione attorno al centro galattico con traiettoria circolare.

Per quanto riguarda invece l'origine di questo tipo morfologico, si può dire che la *SF* avviene in tempi *più lenti* del collasso della nube e il gas ha dunque tempo di collassare sull'asse z prima di essersi trasformato completamente in stelle. Si noti che il bulge ha, in linea di principio, le stesse fattezze di una galassia ellittica: è popolato da stelle più vecchie (rispetto a quelle del disco) che si sono ragionevolmente formate prima del collasso totale della nube sul disco, mantenendo almeno al centro la forma sferoidale della nube protogalattica iniziale. La componente principale delle galassie a spirale è il disco: $\frac{v}{\sigma} > 1$ perchè il moto sistematico derivante dal momento angolare del disco supera i moti random (fig. 10.1).

Figura 10.1: v_{rot} e σ delle galassie a spirale. NGC 6118. In alto, la rappresentazione della galassia (di cui consideriamo la fenditura centrale che comprende tutti i raggi). Al centro, la velocità di rotazione v in funzione del raggio. In basso, la dispersione di velocità σ in funzione del raggio.

L'immagine centrale permette di vedere anche il carattere differenziale della rotazione del disco: visto che $v_{rot} = \omega \cdot r$, per mantenere v_{rot} costante è chiaro che ω deve diminuire, perchè r va aumentando dal centro verso l'esterno.



Per il calcolo della velocità di rotazione del disco si procede considerando la curva di rotazione e la riga in assorbimento dell'idrogeno neutro.

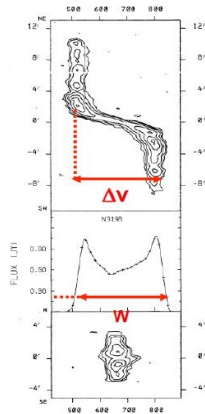


Figura 12: Curva di rotazione galassie a spirale e riga HI. In alto, la curva di rotazione della galassia NGC 3198. Al centro, la riga in assorbimento dell'idrogeno neutro. In basso, la mappa radio (HI) della galassia. Si noti che:

- $W = \Delta v = 2v_{max}$
differenza di velocità tra due velocità massime
- $v_{rot}^i = \frac{v_{rot}^{oss}}{\sin i} \iff W_{rot}^i = \frac{W_{rot}^{oss}}{\sin i}$
 \hat{i} è l'angolo di inclinazione rispetto al piano del cielo

Una volta in grado di calcolare W_R^i , R.B. Tully e J.R. Fisher ricavano l'analogo della legge di Faber-Jackson (sez. 4.1) per le galassie a spirale. La **Relazione di Tully-Fisher** è una legge empirica che lega la velocità massima di rotazione alla luminosità intrinseca e , di conseguenza, alla massa stellare: $L \sim v_{max}^\alpha$; α è un parametro circa uguale a 4, ma il suo valore esatto dipende dalla banda di osservazione.

Il vantaggio di questa relazione è la possibilità di calcolare una quantità difficile da misurare (luminosità intrinseca) sfruttando una quantità che, al contrario, risulta essere facilmente misurabile tramite osservazione diretta (larghezza della riga).

5 Cenni di dinamica delle galassie

In questa breve sezione si vuole affrontare la dinamica stellare in modo tanto qualitativo quanto generale. Segue un'esposizione di alcuni concetti fondamentali nel tentativo di dare un'idea della struttura e dell'evoluzione delle galassie.

Il primo problema che ci si pone è la necessità di determinare se un sistema è *collisionale* o *non collisionale*. Ciò che è di interesse astrofisico è descrivere con più coerenza possibile i sistemi stellari reali, che sono sistemi a N corpi, ma non esiste una soluzione esplicita al problema degli N corpi ($N \geq 3$) per condizioni generiche. È possibile aggirare questo ostacolo sostituendo il *continuo* ($N_* \rightarrow \infty$) al *discreto* (N corpi). Nel passaggio al continuo si deve introdurre il concetto di *tempo di rilassamento a due corpi* (τ_{2b}), visto come limite oltre il quale un sistema passa dall'essere non collisionale all'essere collisionale. Per stimare in modo chiaramente qualitativo τ_{2b} si può, per esempio, calcolare la variazione di energia ($|\Delta E|$) della particella di test per ogni incontro, separatamente. Con questo metodo, per un sistema *autogravitante*, si ha che

$$t_{2b} \sim \frac{0.1 N_* t_{cross}}{\ln N_*} \quad (10)$$

L'equazione 10 non è altro che una stima asintotica (per N_* che tende all'infinito) del tempo di rilassamento a due corpi ed è sufficiente per dedurre che τ_{2b} *aumenta all'aumentare di N_** . È piuttosto immediato rendersi conto del carattere controintuitivo di quest'affermazione. Ci si aspetterebbe, al contrario, una *diminuzione* del tempo di rilassamento come conseguenza dell'aumento del numero di oggetti in un sistema perché così aumenterebbe la probabilità di collisione (intesa, in questo contesto, come *passaggio vicino*).

Si riporta ora un'applicazione astrofisica molto semplice, che permette di dare una conclusione pratica sulla natura delle galassie. Una galassia generica può ragionevolmente essere descritta da $N_* \simeq 10^{11}$ e $t_{cross} \simeq 2 \cdot 10^8$ *anni*: sostituendo questi due valori nell'eq.ne 10, si ottiene $\tau_{2b} \simeq 10^{15-16}$ *anni*²⁴. Il tempo di rilassamento a due corpi così ottenuto risulta essere maggiore dell'età dell'universo. In questo senso, le galassie si definiscono *non collisionali*²⁵. Per questi sistemi vale l'**equazione non collisionale di Boltzmann** alle derivate parziali (eq. 11), che descrive l'evoluzione della funzione di distribuzione f : nel caso di continuo non collisionale l'approssimazione n.c. deve essere valida a ogni tempo.

$$\frac{Df}{Dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \left\langle \vec{v}, \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} \right\rangle - \left\langle \frac{\partial \phi_T}{\partial \vec{x}}, \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} \right\rangle = 0 \quad (11)$$

Tramite sofisticati metodi matematici²⁶, dall'equazione 11 è possibile ricavare le equazioni di Jeans e, da queste, il teorema del viriale in forma scalare:

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} = 2 K + U + W \quad (12)$$

dove I è il momento polare di inerzia, K è l'energia cinetica, U è l'energia potenziale totale (energia gravitazionale esterna e autoenergia gravitazionale) e W è l'energia di interazione. In particolare, l'equazione 12 nella sua forma tensoriale è stata di estrema utilità nella comprensione delle galassie: *le galassie ellittiche sono schiacciate dall'anisotropia del tensore di dispersione di velocità, non dalla rotazione*. L'anisotropia di questo tensore è strettamente legata all'anisotropia del tensore temperatura, data dal fatto che le galassie ellittiche sono *più calde* lungo il loro asse maggiore e *più fredde* lungo l'asse minore²⁷. Il sistema tenderebbe di norma a ridistribuire il più velocemente possibile l'energia cinetica, acquisendo così una forma sferica: succede la stessa cosa anche nel caso delle galassie ellittiche, ma i tempi scala in cui questo avviene sono, come già visto, dell'ordine o addirittura maggiori dell'età dell'universo.

²⁴Sono state fatte due assunzioni (false): *tutti gli incontri tra le particelle sono trattati come se fossero tra loro indipendenti; ogni incontro è trattato come un problema a due corpi iperbolico*.

²⁵Si noti che questo risultato arriva dall'analisi di modelli di galassie: se osservati per un tempo sufficientemente lungo, tutti i sistemi reali di N corpi sono, strettamente parlando, collisionali. Visto che ad oggi non esiste una soluzione valida in generale, si studiano modelli frutto di assunzioni e semplificazioni.

²⁶Non si riportano tali metodi in questo testo poiché esulano dall'approccio qualitativo scelto.

²⁷È proprio la natura tensoriale della temperatura (oltre, ovviamente ad altri elementi qui non menzionati) che distingue un "fluido galattico" da un "fluido ordinario" caratterizzato invece da una temperatura scalare.

Appendice A

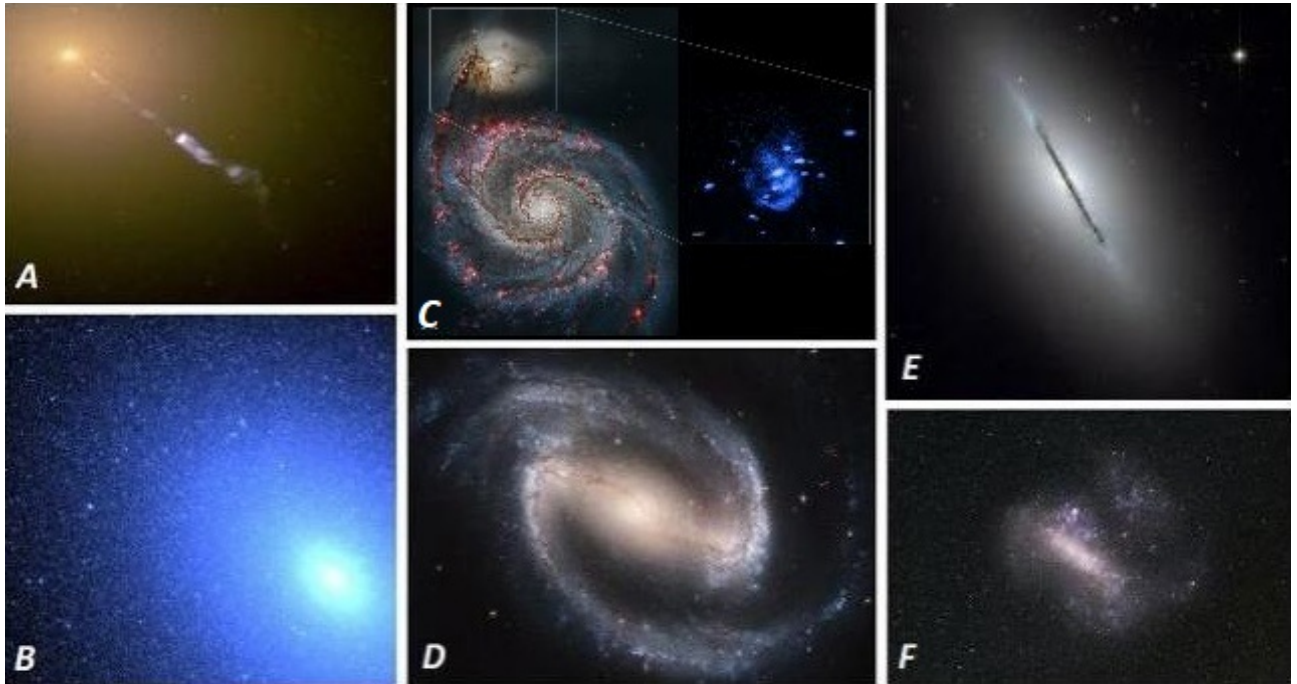


Figura 13: Esempi significativi di galassie.

Fig. A: M87 o NGC 4486, galassia ellittica *gigante*. In figura si vede un fenomeno straordinario: un jet (quasi alla velocità della luce, $c \simeq 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$) di elettroni e altre particelle sub-atomiche generato dal buco nero centrale. Immagine dell'HST (Wide Field Planetary Camera 2) elaborata nel 1998 da J.A. Biretta, W.B. Sparks, F.D. Macchetto e E.S. Perlman. L'immagine è il risultato della combinazione delle osservazioni fatte in diverse bande (UV, B, V, IR).

Fig. B: M32 o NGC 221, galassia ellittica *nana* (è la compagna della Galassia di Andromeda). È un esempio interessante a dimostrazione del fatto che, nonostante le Ellittiche siano popolate da stelle vecchie (rosse), è possibile riscontrare emissione di luce blu. Le stelle sono sempre vecchie, ma appaiono blu per le alte temperature dovute a processi molto energetici che avvengono nel *core*, come la fusione di H e He. HST - NASA, false-color photograph.

Fig. C: M51 o NGC 5194, galassia a spirale non barrata e la compagna M51b o NGC 5194, galassia nana. A sinistra, M51 e M51b nell'ottico; a destra, M51b ai raggi X. *Ottico*: HST (NASA/STScI). *X-ray*: Chandra (NASA/CXC/Univ. of Texas/E.Schlegel et al).

Fig. D: NGC 1300, galassia a spirale barrata. Non si riconosce alcuna attività di AGN, forse perchè non c'è un buco nero centrale o forse perchè non sta accrescendo materia. HST.

Fig. E: NGC 5866, galassia lenticolare (S0). Immagine dell'HST (NASA), galassia vista quasi completamente edge-on dalla nostra *LOS*.

Fig. F: LMC (Large Magellanic Cloud), galassia irregolare. La Silla Observatory (ESO).

Bibliografia

- [1] P. Schneider, *Extragalactic Astronomy and Cosmology - An Introduction*
- [2] J. Binney e S. Tremaine, *Galactic Dynamics*
- [3] J. Binney e M. Merrifield, *Galactic Astronomy*
- [4] B. W. Carroll e D. A. Ostlie, *An introduction to Modern Astrophysics*
- [5] L. Ciotti, *Stellar systems following the $R^{\frac{1}{m}}$ luminosity law, 1991*
- [6] L. Ciotti, *Alcune questioni matematiche riguardanti la dinamica stellare*²⁸
- [7] L. Ciotti e S. Pellegrini, *Appunti di Astrofisica Extragalattica, 2018*

²⁸Estratto da *La Matematica nella Società e nella Cultura* - Bollettino della Unione Matematica Italiana (serie 8, Vol. 5-A, Aprile 2002, pg. 97-141).