

ALMA Mater Studiorum
Università degli Studi di Bologna

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea in Astronomia

Dipartimento di Fisica e Astronomia

Struttura e cinematica della Via Lattea

Elaborato Finale

Candidato:
Elisa Mazzeri

Relatore:
Prof. Daniele Dallacasa



Sessione II – 2° seduta
Anno Accademico 2013/2014

Indice

1	Introduzione storica	1
2	Classificazione delle galassie	2
2.1	Galassie ellittiche	3
2.2	Galassie lenticolari	3
2.3	Galassia a spirale	4
2.4	Galassie irregolari	5
3	Via Lattea	6
3.1	Alone galattico	7
3.2	Disco galattico	7
3.2.1	Disco spesso e sottile	8
3.2.2	Bracci a spirale	8
3.3	Bulge	10
4	Cinematica della Via Lattea	11
4.1	Curva di rotazione	11

Abstract

In questo elaborato sono discusse le proprietà morfologiche delle galassie, ponendo particolare attenzione alla Via Lattea, della quale verranno descritte le caratteristiche intrinseche, come la struttura e i moti delle stelle; infine attraverso le costanti di Oort e l'emissione dell'idrogeno neutro, è possibile ricavare la curva di rotazione e introdurre la presenza della materia oscura.

Capitolo 1

Introduzione storica

La Via Lattea è la galassia nella quale si trova il nostro Sistema Solare. Quale fosse però l'esatta natura della Via Lattea rimase per secoli un mistero, anche se in varie epoche furono fatti tentativi per darne una spiegazione scientifica. Aristotele già nel 300 A.C. ipotizzò che il Sole era immerso in una scia di altre stelle molto distanti detta **Via Lattea**. Questa ipotesi fu confermata da Galileo nel 1610, con la costruzione del primo telescopio rudimentale. Tra il 1700 ed il 1800 prese corpo l'idea che la Via Lattea fosse un immenso sistema di stelle costituenti tutto l'universo, di cui anche il Sole e la Terra fanno parte. Altre teorie dell'epoca, sostenute da Keplero, prevedevano il Sistema Solare al centro dell'universo. Nello stesso periodo queste idee vennero riprese dal filosofo Immanuel Kant, che formulò la nuova ipotesi degli **universi isola**: secondo Kant la Via Lattea era un corpo in rotazione formato da un numero enorme di stelle legate dalla forza di gravità e ipotizzò che essa era solo uno dei tanti universi isola che popolavano il cosmo. Kant inoltre provò ad ipotizzare la struttura della Galassia. La immaginò come un disco schiacciato con un rigonfiamento nella zona centrale.

In seguito l'astronomo William Herschel (1785), con il conteggio delle stelle in varie porzioni di cielo, tentò di definire la forma e le dimensioni della Galassia.

Con il migliorare dei telescopi, nel 1845 Rosse, osservando quelle che allora si pensavano nebulose, distinse oggetti ellittici e a spirale.

Successivamente altri astronomi si occuparono dell'argomento, ma la soluzione del problema risale solo agli anni Trenta con l'astronomo Hubble. Grazie al telescopio Hooker di Mount Wilson, Hubble identificò, all'interno delle nebulosa di Andromeda M31, delle stelle variabili ¹. Queste stelle sono utili indicatori di distanza poiché, grazie alla relazione periodo-luminosità e dal confronto tra magnitudine apparente e assoluta, è possibile ricavare la distanza. Le misurazioni di Hubble dimostrarono inequivocabilmente che M31 è una galassia indipendente situata a oltre 300 kpc dalla nostra.

¹Stella la cui luminosità apparente cambia nel tempo.

Capitolo 2

Classificazione delle galassie

Nel 1936, Hubble presentò uno schema morfologico per classificare le galassie. Con successive aggiunte e modifiche, questo sistema è utilizzato ancora oggi. Hubble riconobbe tre principali tipi di galassie:

- ellittiche;
- lenticolari;
- spirali;

con una quarta classe per le galassie che non rientrano in nessuna delle categorie precedenti:

- irregolari.

Le galassie ellittiche vengono anche chiamate *early type* mentre le galassie a spirale *late type*. Questi termini vengono utilizzati per descrivere la posizione delle galassie lungo la sequenza di Hubble che va dalle ellittiche, alle S0 fino alle galassie a spirale. Alcuni astronomi, tra cui lo stesso Hubble, credevano però che questa progressione descrivesse il ciclo vitale delle galassie: le ellittiche, evolvendosi, diventano S0 e poi spirali. Questa ipotesi viene esclusa osservando che la popolazione stellare delle galassie *early type* è più vecchia e metallica delle *late type*. Localmente circa il 70% delle galassie sono a spirale, 30% sono ellittiche o S0, e il 3% sono irregolari.

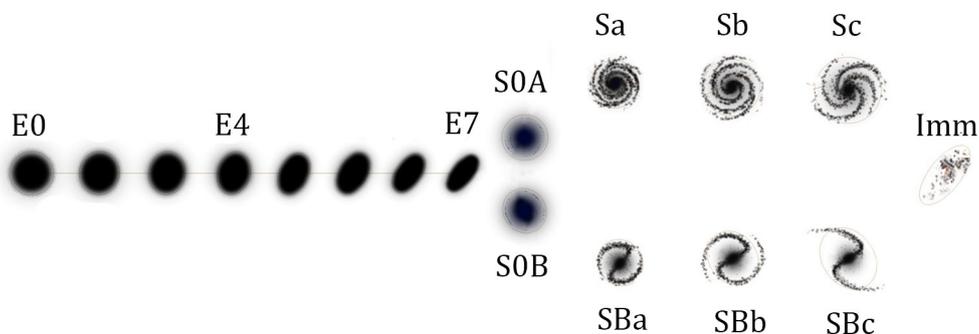


Figura 2.1: Classificazione di Hubble.

2.1 Galassie ellittiche

Le galassie ellittiche presentano una forma che può essere a simmetria quasi sferica o ellissoidale, priva di una struttura interna differenziata come i bracci. Queste galassie vengono suddivise in otto classi: da E0 (sferiche) a E7 (ellitticità assai pronunciata). L'indice n da 0 a 7 rappresenta il **grado di ellitticità** ed è calcolato in base al rapporto assiale apparente (b/a), attraverso la formula:

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

dove a e b sono rispettivamente il semiasse maggiore e minore della galassia. In queste galassie la distribuzione di stelle è piuttosto uniforme, con una cinematica complessa di moti casuali. Essendo prive di gas freddo, le galassie ellittiche hanno poche stelle giovani blu e una maggioranza di stelle vecchie molto metalliche. Queste ultime danno alla galassia l'aspetto rossastro che le caratterizza.

Negli anni 90, attraverso l'analisi delle velocità delle stelle all'interno della galassia, e tenendo conto che questa doveva essere sicuramente inferiore alla velocità di fuga necessaria affinché le stelle abbandonassero la galassia, si intuì che questa dovesse essere provvista di un buco nero supermassiccio di $M \approx 10^{-3} M_{tot}$.

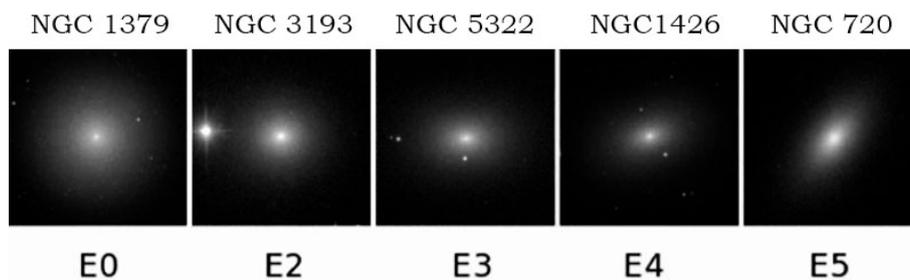


Figura 2.2: Esempi di galassie ellittiche.

2.2 Galassie lenticolari

Le galassie Lenticolari sono generalmente considerate una classe intermedia tra le ellittiche e le spirali. Presentano una forma schiacciata caratteristica delle spirali, ma non mostrano strutture o bracci come le ellittiche. Il disco contiene poca o nessuna materia interstellare perchè è già stata utilizzata in passato per creare stelle. Pertanto presentano una ridotta attività di formazione stellare e sono costituite per lo più da stelle vecchie.

Solo vicino al bulge troviamo della polvere. Le galassie lenticolari possono essere divise in sottoclassi a seconda che abbiano una barra centrale (SB0), un anello interno (SB0(r)) o la forma a S (SB0(s)).



Figura 2.3: Galassia lenticolare M102

2.3 Galassia a spirale

Le galassie a spirale sono chiamate così per la loro struttura caratteristica. Sono formate da un disco di gas e polvere, con al centro un rigonfiamento detto **bulge** più o meno prominente, in cui sono concentrate le stelle. Da questo partono alcuni bracci a spirale che si avvolgono attorno ad esso. Il contenuto di queste galassie è piuttosto disomogeneo anche se il moto degli oggetti all'interno è più regolare rispetto alle galassie ellittiche. Nei bracci troviamo una grande quantità di gas freddo mischiato a polvere, nella quale abbiamo in corso formazione stellare. Ciò fa sì che questi siano più brillanti rispetto al disco circostante perché contengono stelle più giovani di tipo O e B che sono più calde e che caratterizzano la galassia con un colore blu.

Hubble ha diviso le galassie a spirale in due categorie: le galassie a spirale S, le quali presentano dei bracci che si dipartono direttamente dal bulge, e le spirali barrate (SB), che sono caratterizzate da una struttura centrale allungata simile a una barra dalla quale si originano i bracci. Si stima che circa metà delle galassie a spirale e lenticolari rientrano in questa categoria. Successivamente è stata introdotta un'ulteriore classificazione in base a tre importanti caratteristiche:

1. la tensione più o meno marcata dell'avvolgimento dei bracci a spirale;
2. la grandezza del rigonfiamento centrale;
3. il disco della galassia.

Questa classificazione introduce 3 nuove categorie di galassia: Sa, Sb, Sc (per quelle barrate SBa, SBb, SBc).

- Le galassie Sa hanno il bulge più grande e i bracci sono più avvolti;
- Le galassie Sb sono intermedie tra le Sa e le Sc;
- Le galassie Sc hanno il bulge più piccolo e i bracci sono più aperti.

Lungo la sequenza da Sa a Sc, il bulge centrale diventa sempre meno importante rispetto al disco, quindi i bracci a spirale diventano più aperti e la frazione di gas e di stelle giovani aumenta. Si è oggi quasi certi che la Via Lattea sia probabilmente una galassia intermedia di tipo Sbc. Alcuni studi condotti negli ultimi anni, concentrati sull'analisi della distribuzione della luminosità, hanno inoltre portato a supporre l'esistenza di una barra.



Figura 2.4: Galassia NGC 1232, tipo Sc



Figura 2.5: Galassia NGC 1300, tipo SBc.

2.4 Galassie irregolari

Hubble pone tutte le galassie che non rientrano nelle tre categorie precedenti, nella classe delle galassie irregolari. Le galassie irregolari a differenza delle altre, non possiedono alcuna struttura o simmetria riconoscibile e si dividono a loro volta in due sottoclassi:

- le Irr I è possibile risolverle in alcune strutture come stelle e nebulose;
- le Irr II non si riescono a risolverle e hanno un aspetto amorfo molto generico.

Le galassie irregolari costituiscono solo una piccola frazione del totale (all'incirca il 3%) e possiedono un quantitativo di gas superiore a quello presente nelle galassie a spirale; per questa ragione contengono molte stelle giovani, da cui deriva la loro caratteristica colorazione blu. Spesso le irregolari sono associate ad una grossa galassia spirale, di cui sono galassie satellite. È il caso della Piccola e della Grande Nube di Magellano, due piccole galassie irregolari che si trovano a circa 55 e 65 kpc dalla Via Lattea.



Figura 2.6: Piccola e Grande nube di Magellano, sono galassie satellite irregolari della Via Lattea.

Capitolo 3

Via Lattea

La Via Lattea si trova in un insieme di galassie denominato **Gruppo Locale** che comprende più di 35 galassie, per la maggior parte di piccole dimensioni, con il centro di massa posto in un punto compreso fra la Via Lattea e la Galassia di Andromeda. All'interno della Via Lattea troviamo un vasto assortimento di stelle che compongono una struttura complessa ma ordinata. Osservandola dalla Terra, che giace in uno dei suoi bracci di spirale, appare come una fascia più densa di stelle che percorrere trasversalmente l'intera volta celeste e appare di aspetto leggermente diverso a seconda dell'emisfero in cui la si osserva. Si stima che la Via Lattea contenga almeno 2×10^{11} stelle la cui massa, assieme a tutta la materia visibile, è di $M \approx 10^{12} M_{\odot}$ suddivisa in:

- $M_{stelle} = 5 \times 10^{10} M_{\odot}$: massa stellare collocata principalmente nel disco;
- $M_{gas} = 5 \times 10^9 M_{\odot}$: situata soprattutto nel disco;
- $M_{polvere} = 3 \times 10^7 M_{\odot}$

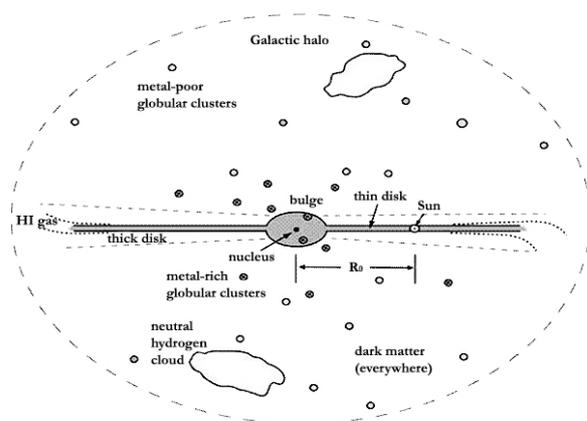
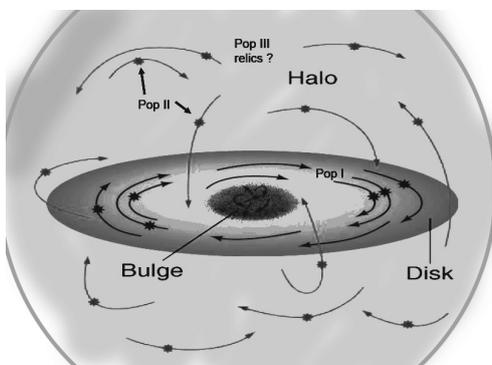


Figura 3.1: Struttura della Via Lattea.

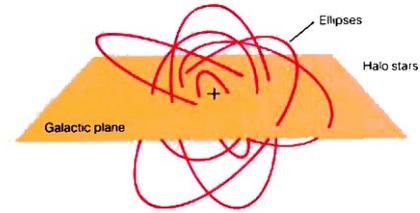
La luminosità in ottico prodotta da questi componenti, è stimata essere $L \approx 7 \times 10^9 L_{\odot}$. Esaminando le stelle nelle vicinanze del Sole, si osserva che hanno differenti proprietà cinematiche e diverse metallicità¹. Queste due caratteristiche determinano la struttura della galassia in tre componenti principali, comuni a tutte le galassie a spirale:

- Alone galattico;
- Disco centrale e bracci;
- Centro galattico.

¹la metallicità è espressa come $[Fe/H]$, che rappresenta il logaritmo del rapporto dell'abbondanza di ferro della stella rispetto a quella del Sole: $[Fe/H] = \log (Fe/H) - \log (Fe/H)_{\odot}$

3.1 Alone galattico

L'alone galattico è una struttura sferica di stelle, con raggio di circa 40 kpc che circonda l'intera galassia senza avere un confine ben definito. È privo di polveri e gas, infatti è composto da stelle molto vecchie, povere di metalli, dette di **alone**. Le stelle di alone formano solo una piccola frazione della massa della galassia ed ammontano a non più di $M_{halo} \approx 10^9 M_{\odot}$. Hanno orbite non ordinate e presentano grandi inclinazioni rispetto al piano della galassia, moti retrogradi o caotici che raggiungono anche i 400 km s^{-1} .



Molte delle stelle di alone sono concentrate in ammassi globulari. Ne sono conosciuti oltre 150, di diametro che va dai 30 ai 70 pc, contenenti migliaia di stelle. Gli ammassi globulari nell'alone hanno metallicità molto diverse. Ciò indica che hanno diverse età, perciò non possono essere stati formati nello stesso periodo. Questa evidenza è spiegata dall'idea di Searle e Zinn: l'alone è stato formato dall'aggregazione di molti frammenti di nubi che non sono riuscite a diventare parte della Via Lattea, evolvendo indipendentemente le une dalle altre. Il modello di Searle e Zinn è stato confermato da osservazioni di galassie piccole o nane, che continuano a collidere con la Via Lattea. Queste galassie nane sono l'evoluzione dei frammenti di nubi.

Oltre alla porzione visibile di alone sembra esistere una porzione esterna molto più grande formata da materia oscura, conosciuta come alone oscuro, che si osserva solo per effetti gravitazionali sulle curve di rotazione delle galassie a spirale.

3.2 Disco galattico

Il disco galattico è la regione nella quale si concentra la grande maggioranza delle stelle e del gas di una galassia a spirale. La luminosità del disco è $L_{disco} \approx 2 \times 10^{10} L_{\odot}$ con una massa pari a $M_{disco} \approx 6 \times 10^{10} M_{\odot}$. Esso è generalmente piuttosto sottile (1 kpc) mentre il suo raggio è circa 15 kpc. Al suo interno sono presenti i bracci a spirale, marcati da numerose stelle blu appena formate e molto luminose.

Questa regione della galassia è composta da stelle che hanno uno spettro d'età ampio e materia diffusa. Quest'ultima è definita ISM (Inter Stellar Medium) ed è formata da nubi di HI, HII, H_2 , nubi molecolari e polvere. In generale l'ISM è composta da 4 fasi:

- Hot Ionized Medium (HIM) a $T > 10^6 \text{ K}$: composto da gas caldo la cui temperatura elevata è dovuta alle onde d'urto generate dalle esplosioni di supernova;
- Warm Ionized Medium (WIM) a $T \approx 10^4 \text{ K}$: costituito da gas ionizzato dalla radiazione UV emessa da stelle giovani di grande massa, molto calde (O e B). Si manifesta con nubi di idrogeno ionizzato HII;
- Warm Neutral Medium (WNM) a $T \approx 100 - 10^3 \text{ K}$: composto da gas neutro a bassa densità, principalmente atomico. Si presenta sotto forma di regioni di idrogeno neutro HI che compone il 97 % dell'idrogeno gassoso dell'ISM e viene riscaldato da radiazione UV, X o raggi cosmici a bassa energia;
- Cold Neutral Medium (CNM) a $T \approx 10 - 100 \text{ K}$: composta da gas neutro freddo di nubi di idrogeno neutro HI, da idrogeno molecolare H_2 , nubi molecolari come CO e polvere.

Ognuna di queste fasi caratterizza le diverse parti del disco galattico. Il totale della massa di stelle e ISM è stimato essere $M \approx 10^{10} M_{\odot}$ con una luminosità ottica complessiva di $L \approx 1.5 \times 10^{10} L_{\odot}$. Il disco galattico è composto da tre strutture:

- disco spesso: contiene circa il 5 % delle stelle del disco ed ha un'altezza scala ² di 1 kpc;
- disco sottile: contiene circa il 95 % delle stelle del disco ed ha un'altezza scala di 200-400 pc;
- bracci a spirale.

3.2.1 Disco spesso e sottile

I due dischi sono immersi l'uno nell'altro. La suddivisione è possibile perché le stelle del disco spesso e sottile hanno dinamica e metallicità diverse.

Dinamicamente i dischi si distinguono per la loro dispersione di velocità verticale ³: nel disco sottile quest'ultima è molto più bassa che quella del disco spesso. Osservando, invece la metallicità, si nota che le stelle del disco sottile sono un po' più metalliche e giovani delle stelle che stanno nel disco spesso. La differenza di metallicità ha permesso di determinare che le stelle del disco spesso sono state create prima rispetto quelle del disco sottile, infatti sono povere di metalli dato che, all'inizio della formazione stellare, l'ISM non si era ancora arricchito dei metalli prodotti successivamente dalle stelle morenti (Supernova o nebulose planetarie). In queste due strutture, l'ISM si trova nella fase WNM. Le nubi fredde di HI sono importantissime perché ci permettono di determinare la curva di rotazione della galassia attraverso la riga proibita dell'HI a 21 cm (radio).

3.2.2 Bracci a spirale

Sopra al disco, senza una divisione netta, troviamo i bracci a spirale che partono dal bulge e si estendono per tutto il disco. I bracci sono formati principalmente da stelle giovani, metalliche e ISM. Quest'ultimo si trova nella fase di CNM e WIM. Il CNM, grazie alle caratteristiche di densità e temperatura, permette il collasso della materia portando a formazione stellare (distinguibile attraverso una forte riga di emissione dell' H_{α}).

La struttura dei bracci non si vede dalla nostra posizione all'interno del disco sottile, ma è stata determinata paragonando i dati osservativi con quelli delle altre galassie. Le linee mediane dei bracci sono approssimativamente spirali logaritmiche di equazione:

$$\vartheta = \vartheta_1 + \frac{1}{k} \log \left(\frac{R}{R_0} \right)$$

dove ϑ ed R sono le coordinate polari galattocentriche e k è una costante.

Le spirali sono dette convergenti (leading) se, muovendosi lungo il braccio verso l'esterno, si segue il verso di rotazione. Sono dette divergenti (trailing) nel verso opposto. Dalle osservazioni spettroscopiche non si riesce in genere a capire se un sistema è convergente o divergente.

²distanza dopo la quale la densità di stelle diminuisce di un fattore e.

³Velocità con cui si discostano dal piano galattico.

Teoria dell'onda di densità

Il primo problema che si deve affrontare quando ci si occupa della struttura a spirale è il cosiddetto **dilemma dell'arrotolamento**: a causa della rotazione differenziale i bracci a spirale, nel corso delle molte rivoluzioni che la galassia ha compiuto dalla sua formazione, avrebbero dovuto avvilupparsi sempre di più, nel caso siano bracci convergenti, e srotolarsi se i bracci sono divergenti. Poiché i periodi di rivoluzione delle regioni esterne della galassia sono di circa 10^8 anni, queste hanno compiuto un centinaio di rivoluzioni, pertanto i bracci a spirale dovrebbero essere strettamente arrotolati, al contrario di quello che osserviamo.

La formazione e persistenza della struttura dei bracci è descritta dalla **teoria dell'onda di densità**. L'ipotesi di Lin-Shu riguardo i bracci a spirale delle galassie viene formulata negli anni 1964-1966. Lin e Shu riconobbero correttamente come la struttura a spirale del disco potesse essere interpretata come un' **onda di densità**, ovvero un'oscillazione che si propaga attraverso il disco. La perturbazione rallenta il moto di stelle e gas, generando un accumulo di particelle con un conseguente aumento di densità. La teoria mostra che si può formare un sistema di onde persistenti in cui la densità è massima lungo linee che hanno la forma di spirali logaritmiche, formando più facilmente spirali con due braccia simmetriche di tipo trailing.

Affinché si formi un'onda di densità è importante che la velocità disordinata del gas e delle stelle non superi determinati valori critici. Le stelle in genere sono dotate di alte velocità casuali, sovrapposte al moto circolare medio, per cui rispondono debolmente alla perturbazione e non subiscono una apprezzabile variazione di densità. Il gas invece, le cui velocità disordinate sono piuttosto basse a causa di effetti di tipo viscoso, risponde meglio alla perturbazione. Ad ogni rivoluzione intorno al centro galattico, la nube di gas passa più volte attraverso l'onda di densità, ed in ciascun passaggio entra con una velocità supersonica, per cui si sviluppa un fronte d'urto e si ha una forte compressione. Questa compressione produce nel gas delle instabilità che ne favoriscono la frammentazione e quindi la formazione di stelle. Le stelle più grosse possono poi ionizzare l'idrogeno circostante e quindi generare regioni HII.

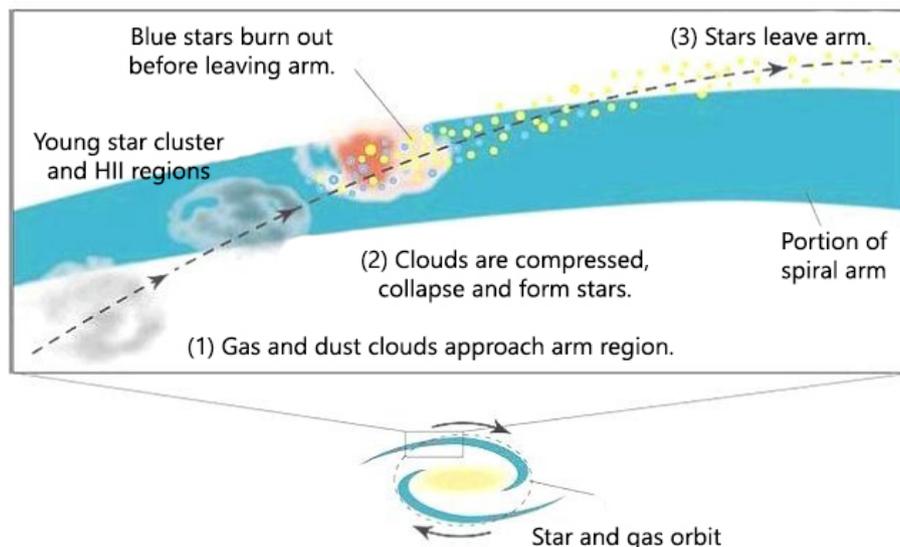


Figura 3.2: Scenario per il tracciamento dei bracci di spirale da parte delle nubi molecolari. Quando il gas entra nel braccio viene rallentato e compresso. Questo comporta la formazione delle stelle. La radiazione UV proveniente da stelle di tipo O e B provoca la disgregazione delle nubi molecolari rimaste.

3.3 Bulge

Col termine bulge ci si riferisce al gruppo centrale di stelle situato nelle regioni centrali della galassia, che forma un rigonfiamento sferoidale esteso per qualche kpc. La materia diffusa è presente in quantità minore rispetto al disco, e si trova nella fase più calda HIM mentre abbiamo un aumento di densità stellare. Queste due componenti, producono una massa di $M_{bulge} \approx 2 \times 10^{10} M_{\odot}$.

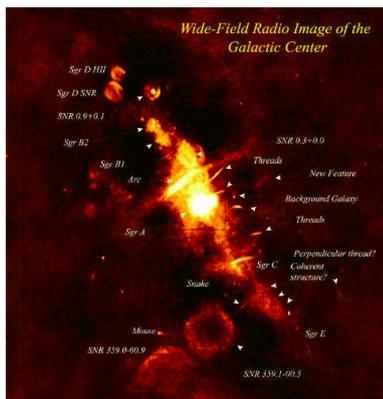
Le stelle del bulge sono vecchie di qualche miliardo di anni e sono molto più metalliche delle stelle dell'alone, nonostante si pensi appartengano alla stessa epoca. Le stelle ruotano intorno al centro della galassia come il disco ma in modo disordinato e caotico come i moti presenti nelle galassie ellittiche. Da questa evidenza possiamo determinare la luminosità del bulge attraverso una relazione che si evidenzia nelle galassie ellittiche detta **Faber-Jackson**, che lega la luminosità con i moti casuali delle stelle che sono misurati con la dispersione di velocità σ ⁴:

$$L \propto \sigma^4$$

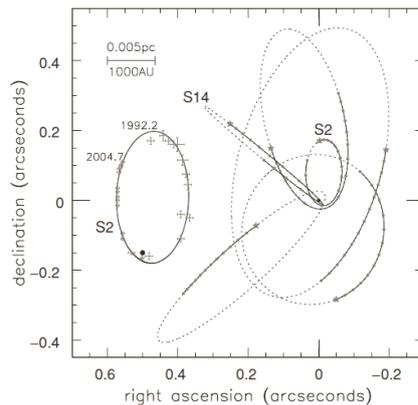
Risulta che il bulge ha una luminosità di $L_{bulge} \approx 5 \times 10^9 L_{\odot}$. Il bulge delle galassie a spirale e S0 mostrano questa stessa relazione con l'unica differenza che le galassie ellittiche hanno un valore più grande di σ ad una data luminosità.

All'interno del bulge possiamo definire il nucleo galattico che è il centro di rotazione della Via Lattea con dimensione di circa 500 pc. L'osservazione di questa regione avviene attraverso la radiazione infrarossa, radio e X che, a differenza della luce visibile, viaggia indisturbata attraverso le nubi di polvere del disco.

Dallo studio del gas ionizzato, si è concluso che il centro galattico è occupato da una potente radiosorgente denominata Sagittarius A (SgrA) che coincide con il centro dinamico della galassia. La massa di questo oggetto è stata determinata nel 1997 da Eckert e Genzel dalla velocità radiale delle stelle che presentano un moto kepleriano nelle strette vicinanze di SgrA, con una stima di $M_{BH} \approx 2 \times 10^6 M_{\odot}$ compresa in una regione di 0.015 pc del nucleo. Questa concentrazione di massa è spiegabile con un buco nero supermassiccio.



(a) Immagine del centro galattico in IR.



(b) Orbite di varie stelle in prossimità del centro galattico. Hanno permesso di determinare la massa presente in SgrA*.

⁴deviazione dalla velocità media.

Capitolo 4

Cinematica della Via Lattea

La cinematica complessiva di una galassia, si ottiene dalla **curva di rotazione**: questa descrive la velocità con cui gas e stelle ruotano attorno al centro galattico ad una distanza galattocentrica R qualsiasi. Ciò è utile per determinare anche la distribuzione di massa nella Galassia.

4.1 Curva di rotazione

La curva di rotazione della Via Lattea ed in generale per tutte le galassie a spirale, è una curva di rotazione differenziale: le parti esterne si muovono con una velocità angolare minore rispetto alle parti interne mentre la velocità radiale V_R rimane costante.

Questa curva si ottiene dalla determinazione di V_R attraverso lo spostamento doppler delle righe di nubi atomiche e molecolari. La rotazione differenziale infatti, produce un effetto doppler nelle linee spettrali che sono diverse a seconda della distanza dal centro galattico. A causa delle diverse velocità angolari, si osserva che gli oggetti hanno un redshift per $R < R_0$ e un blueshift per $R > R_0$ (figura 4.1).

Per calcolare la velocità radiale V_R di una stella o di una nube, assumiamo che il moto sia circolare. Al raggio R_0 il Sole orbita con velocità V_0 , mentre una stella P a raggio R orbita con una velocità $V(R)$. Questa situazione è rappresentata in figura 4.2(a).

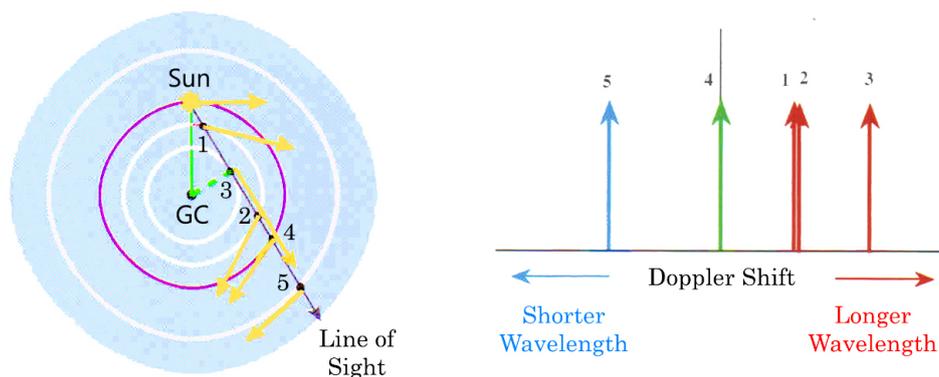
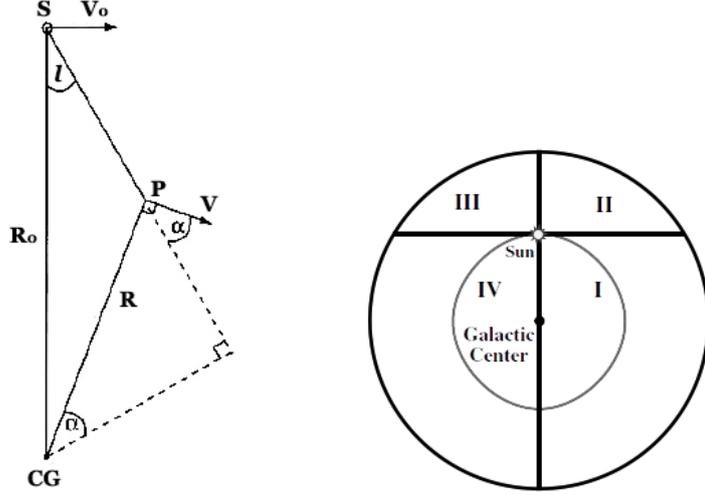


Figura 4.1: Effetto doppler di oggetti a diversa distanza dal centro galattico.



(a) Rotazione differenziale e velocità radiali del Sole e di un oggetto P. (b) Rappresentazione della galassia divisa in quadranti.

Figura 4.2

La velocità radiale relativa alla nostra posizione, è data da:

$$V_R = V(R) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - V_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} - l\right)$$

Utilizzando l'identità trigonometrica di addizione $\cos(\alpha + \beta) = \sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha \cos \beta$, sostituendo le velocità radiali con $V(R) = \Omega R$, ed esprimendo tutto in funzione di l , unico angolo misurabile, si ottiene:

$$\begin{aligned} V_R &= V(R) \sin \alpha - V_0 \sin l = R\Omega(R) \sin \alpha - R_0\Omega_0 \sin l \\ &= \left(\Omega(R) - \Omega_0\right) R_0 \sin l = R_0 \sin l \left(\frac{V}{R} - \frac{V_0}{R_0}\right) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Se la Via Lattea ruotasse rigidamente, le distanze tra le stelle non cambierebbero e V_R sarebbe sempre nullo. In realtà la velocità angolare V/R cala all'aumentare del raggio. Per capire il comportamento di V_R è utile suddividere la galassia in quadranti come in figura 4.2(b) basati sul valore di l . L'equazione 4.1 ci dice che:

- I quadrante: $0 < l < \pi/2$
 $V_R > 0$ per oggetti con $R < R_0$: $\Omega(R) > \Omega_0$. V_R e $\Omega(R)$ aumentano al diminuire di R ;
 $V_R < 0$ per oggetti con $R > R_0$: $\Omega(R) < \Omega_0$. V_R e $\Omega(R)$ diminuiscono all'aumentare di R ;
- II quadrante: $\pi/2 < l < \pi$
 $V_R < 0$ perché gli oggetti hanno tutti $R > R_0$ e li vediamo avvicinarsi.
- III quadrante: $\pi < l < \frac{3}{2}\pi$
 $V_R > 0$ perché gli oggetti hanno tutti $R > R_0$ e li vediamo avvicinarsi.
- VI quadrante: $\frac{3}{2}\pi < l < 2\pi$
Si ripete l'andamento del I quadrante con la differenza che il segno di V_R è invertito.

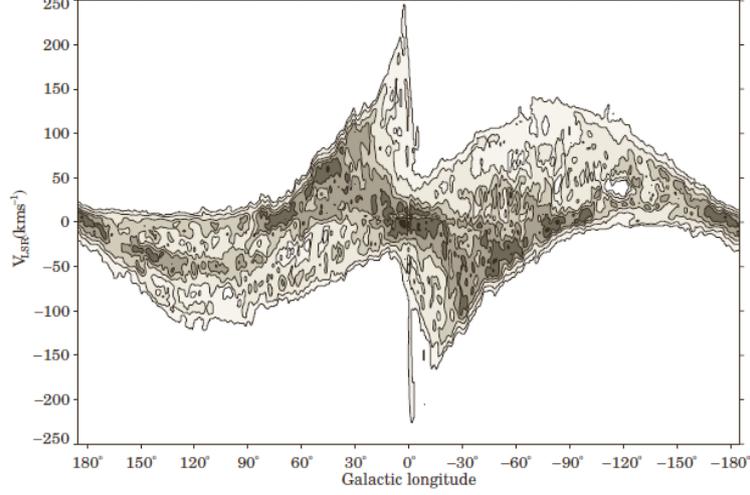


Figura 4.3: Grafico della curva di rotazione della Via Lattea ottenuto dall'intensità di emissione della riga 21 cm dell'HI nel disco della galassia. Come ci si aspetta non c'è gas con velocità positive nel secondo quadrante e con velocità negative nel III quadrante. Le bande scure sottili che si estendono lungo diversi gradi di longitudine mostrano dove il gas è stato addensato e la sua velocità cambiata dalle forze gravitazionali nei bracci di spirale.

Il risultato di questo studio attraverso la riga a 21 cm dell'HI, è riportato in figura 4.3. Il moto proprio di un oggetto P relativo al Sole può essere calcolato in modo analogo. Dalla figura 4.2(a), la velocità tangenziale è:

$$\begin{aligned}
 V_T &= V(R) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - V_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - l\right) \\
 &= V(R) \cos \alpha - V_0 \cos l = R\Omega(R) \cos \alpha - R_0\Omega_0 \cos l \\
 &= \left(\Omega(R) - \Omega_0\right)R_0 \cos l - \Omega(R)d
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Le relazioni 4.1 e 4.2 sono formule per la rotazione differenziale del disco: sono identità esatte. Non ci sono approssimazioni tranne l'ipotesi iniziale di moto circolare e ci identificano, per ogni oggetto, l'effetto doppler V_R e il moto proprio V_T . Quando l'oggetto P si trova nelle vicinanze del Sole ($d \ll R_0$), possiamo espandere in serie di Taylor al primo ordine $\Omega(R)$ da cui poi riscrivere sia $R \approx R_0 - d \cos l$ sia $R_0 - R \approx d \cos l$. Con questa approssimazione la 4.1 e 4.2 diventano:

$$V_R \approx d \sin 2l \left[-\frac{R}{2} \left(\frac{V}{R} \right)' \right]_{R_0} \equiv dA \sin 2l \tag{4.3}$$

$$V_T \approx d \cos 2l \left[-\frac{R}{2} \left(\frac{V}{R} \right)' \right]_{R_0} - \frac{d}{2} \left[\frac{1}{R} (RV)' \right]_{R_0} \equiv d[A \cos 2l + B] \tag{4.4}$$

dove l'apice indica la derivata rispetto ad R mentre A e B sono le **costanti di Oort**. Facendo il fit dei dati osservativi troviamo che A è l'ampiezza della curva sinusoidale e B è lo scostamento verticale dallo 0 (figura 4.4). Per il Sole si ottiene:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{2} \left(V_0' - \frac{V_0}{R_0} \right) = (14.4 \pm 1.2) \text{ km s}^{-1} \text{ kpc} \\
 B &= \frac{1}{2} \left(V_0' + \frac{V_0}{R_0} \right) = (-12.0 \pm 2.8) \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}
 \end{aligned}$$

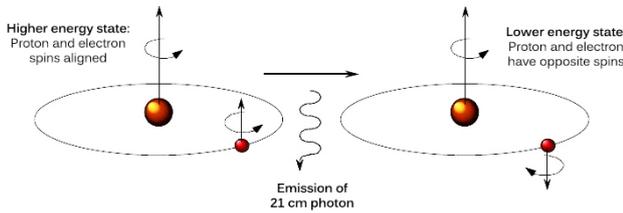
Dalla loro somma determiniamo la deviazione dalla rotazione rigida V'_0 e dalla loro differenza determiniamo la velocità angolare locale V_0/R_0 che sono rispettivamente:

$$A + B \approx 3 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}$$

$$B - A \approx 27 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}$$

Inserendo la distanza del Sole dal centro galattico (8.7 kpc), otteniamo che la velocità di rotazione è circa $V_0 \approx 245 \text{ km s}^{-1}$. Le costanti di Oort ci permettono di determinare la curva di rotazione, ma sono valide solo per $R \approx R_0$, quindi solo in prossimità del Sole. Per determinare la curva di rotazione per $R < R_0$ si possono sfruttare le nubi di gas HI che emettono a 21 cm (radiazione trasparente all'ISM), mentre per $R > R_0$ possiamo ricorrere a due metodi: si ricorre a sorgenti di cui si può determinare la distanza ed utilizzare le relazioni generali di V_R e V_T (rispettivamente 4.1 e 4.2), oppure si utilizza l'effetto doppler di nubi molecolari.

La curva di rotazione, nel primo caso, viene determinata dalla riga 21 cm (1420 MHz) emessa dall'HI. Questa emissione è dovuta al cambio di configurazione della struttura iperfine dell'atomo di idrogeno neutro.



Quando avviene il cambiamento da parallelo ad antiparallelo, abbiamo un salto di energia pari a $\Delta E = 5.874 \times 10^{-6} \text{ eV}$ che corrisponde ad una emissione di $\lambda = 21 \text{ cm}$. Con questa transizione abbiamo una emissione in riga che ci permette, attraverso l'effetto doppler, di dedurre la velocità radiale attraverso la formula:

$$V_R = \frac{\lambda_{21\text{cm}} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} \times c$$

La probabilità che questa transizione avvenga, è descritta dal coefficiente di Einstein dell'emissione spontanea: $A = 2.85 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$. Questa probabilità è estremamente bassa per questo viene definita **proibita**. Il tempo di decadimento radiativo allo stato fondamentale, infatti, è pari a 10^7 anni. Questo tempo però viene accorciato dalle collisioni di diseccitamento che lo riducono a circa 300 anni. Nonostante sia proibita, questa riga è ben visibile perché abbiamo enormi masse di HI (97 % dell'idrogeno che compone l'ISM).

La determinazione di V_R con la riga 21 cm, sfrutta il fatto che per $R < R_0$, ad una fissata distanza, l'effetto doppler presenta un massimo in direzione longitudinale. Questa caratteristica non è rilevata per $R > R_0$ per questo si utilizzano osservazioni di nubi molecolari di CO (che sono associate alle nubi di H_2). Queste hanno fornito un metodo diretto per la determinazione della curva di rotazione al di fuori dell'orbita solare, affidabile fino a 20 kpc. Prima delle

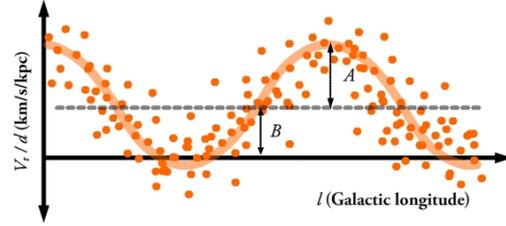


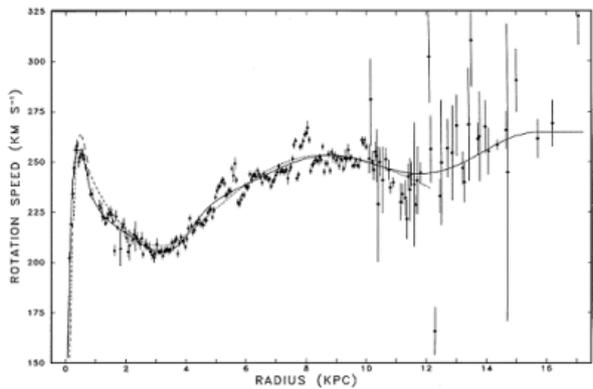
Figura 4.4: Costanti di Oort misurate attraverso il fit dei dati.

Per spiegare questa transizione, introduciamo brevemente la configurazione di questo atomo. L'idrogeno è composto da un elettrone e un protone, dotati entrambi di momento angolare intrinseco, chiamato **spin**. Queste due particelle possono avere due configurazioni possibili: parallelo (stato eccitato - più energetico) ed antiparallelo (livello inferiore - meno energetico).

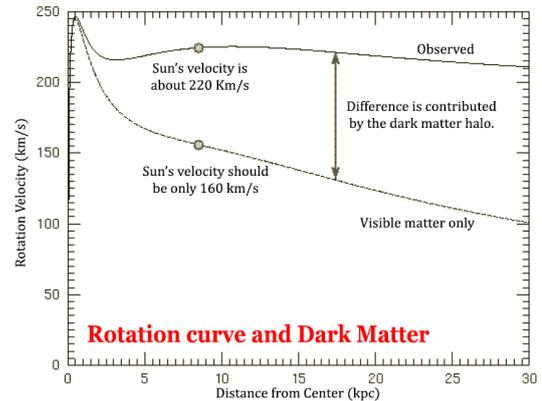
osservazioni molecolari, si assumeva che, oltre R_0 , ci fosse distribuzione di massa decrescente come la luminosità. Questo doveva produrre, oltre la fine della materia visibile, una curva di rotazione di tipo kepleriano $V_R \propto 1/\sqrt{r}$ tendente a zero per grandi $R \rightarrow \infty$.

Combinando le curve di rotazione ottenute con HI e CO, invece, si ottenne il grafico in figura 4.5(a).

- Nelle parti interne del bulge abbiamo rotazione di corpo rigido $V \propto R$ e quindi una densità costante $\rho(R) \propto \rho_0$.
- Nelle parti esterne al bulge la velocità radiale è costante ed è spiegabile con una densità $\rho(R) \propto R^{-2}$.



(a) Curva di rotazione della Via Lattea.



(b) Confronto tra curva di rotazione osservata ed ipotizzata.

Figura 4.5

$V(R)$ costante implica $M \approx R$. Vediamo quindi che la massa racchiusa all'interno di un determinato raggio R cresce linearmente con il raggio stesso e siamo così costretti a ipotizzare che esista una grande quantità di materia non luminosa situata in un alone che si estende ben oltre i confini della materia visibile, e che interagisce esclusivamente attraverso la forza gravitazionale.

Dalla differenza di curva di rotazione aspettata e misurata (figura 4.5(b)), si stima che, per la nostra galassia, la materia oscura sia $M_{DM} \approx 2 \times 10^{12} M_{\odot}$. Dalle curve di rotazione di varie galassie a spirale si è potuto dedurre che la materia oscura varia da circa 50% nelle galassie Sa e Sb, fino a 80-90 % nelle Sc.

Bibliografia

- [1] James Binney, Michael Merrifield, *Galactic Astronomy*. Princeton University Press, 1998.
- [2] Linda Sparke, John Gallagher, *Galaxies in the Universe*. Cambridge, 2007.
- [3] Leonid S. Marochnik, Anatoly A. Suchkov, *The Milky Way galaxy*. Gordon and Breach publishers, 1997.
- [4] Sidney van den Bergh. *The Galaxies of the Local Group*. Cambridge Astrphysics Series, 2000.
- [5] C. Fanti, R.Fanti, *Lezioni di radioastronomia*. Dispense, 2012.
- [6] Cristina Chiappini, *The Formation and Evolution of the Milky Way*. Articolo da American Scientist, 2001.