

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Astronomia

Struttura e cinematica della Via Lattea

Tesi di laurea

Presentata da:
Lorenzo Beccaceci

Relatore:
Chiar.mo Prof. Daniele Dallacasa

Anno accademico 2020/2021

Abstract	2
Capitolo 1	3
1 Classificazione delle galassie	3
1.1 Galassie Ellittiche	3
1.2 Galassie Lenticolari	4
1.3 Galassie a Spirale	4
1.4 Galassie irregolari	6
Capitolo 2	7
2. La struttura della Via Lattea	7
2.1 Bulge, barra e nucleo galattico	8
2.2 Alone galattico	9
2.3 Disco e bracci a spirale	10
2.4 Gas coronale galattico della Via Lattea	11
Capitolo 3	12
3. Cinematica della Via Lattea	12
3.1 Rotazione Differenziale e formule di Oort	12
3.2 Curva di rotazione della Galassia	14
3.3 Teoria dell'onda di densità	16
Bibliografia	17

Abstract

La nostra galassia, la Via Lattea (dal greco γάλα, γάλακτος), ha una struttura che mostra numerose complessità che si trasformano in un ordine elegante. La prima osservazione diretta risale ai tempi di Galileo Galilei, il primo a esaminarla attraverso l'uso del telescopio. E' nota la sua forma a disco a spirale, struttura simile a molte altre galassie che osserviamo; contiene centinaia di miliardi di stelle, tra cui il Sole e il sistema solare che ci ospita.

Dopo l'esposizione della classificazione delle galassie e delle loro caratteristiche fondamentali nel primo capitolo, si introduce la struttura della nostra galassia, con un'analisi delle principali regioni che la compongono.

Nel terzo capitolo si esamina la sua cinematica, introducendo la rotazione differenziale con i coefficienti di Oort e la curva di rotazione, che descrive la velocità con la quale le stelle orbitano attorno al centro galattico.

Capitolo 1

1 Classificazione delle galassie

Una galassia è un enorme insieme di stelle, resti stellari, gas interstellari, polvere e materia oscura, tenuti insieme dalle forze gravitazionali.

Ci sono probabilmente più di 170 miliardi di galassie nell'Universo osservabile, che presentano un'ampia varietà di forme. A partire dall'osservazione di queste ultime, è utile quindi stabilire una classificazione, che permetta di schematizzare le proprietà quantitative e qualitative.

Il modello di classificazione morfologica elaborato da Hubble nel 1926, oggi naturalmente implementato grazie alle nuove conoscenze, è attualmente il riferimento più diffuso e utilizzato. Il motivo di tale importanza è dovuto alla capacità di racchiudere la maggior parte delle galassie osservate all'interno di uno schema semplice ed elegante.

Definita in base alle forme osservate dalla Terra, la sequenza di Hubble si è rivelata sorprendentemente robusta: molte proprietà fisiche delle galassie sono correlate alla morfologia della classificazione.

Hubble distingue quattro classi principali: galassie ellittiche, galassie lenticolari, galassie a spirale, ovvero sistemi a forma di disco altamente appiattiti con "bracci" a spirale nel disco, e galassie irregolari, che mostrano un aspetto caotico e che solitamente hanno subito violente collisioni recenti.

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 fino alle galassie a spirale. Si pensava erroneamente che questa progressione descrivesse il ciclo vitale delle galassie: le ellittiche, evolvendosi e ruotando, avrebbero dovuto appiattirsi, diventando lenticolari e poi spirali.

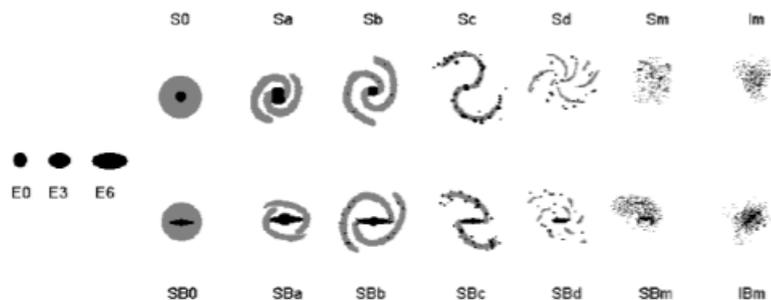


Figura 1: Sequenza di Hubble della classificazione delle Galassie. Fonte: [1]

1.1 Galassie Ellittiche

Le galassie ellittiche hanno distribuzioni luminose uniformi e appaiono come ellissi nelle immagini fotografiche. Mostrano poche prove della presenza di giovani stelle, gas o polvere, infatti presentano colori rossastri.

Le stelle nelle galassie ellittiche tendono a muoversi ad alta velocità e in modo più casuale rispetto a quelle nelle galassie a spirale, che presentano invece un moto di rotazione più ordinato.

Al contrario delle galassie a spirale, che tendono a vivere in regioni di bassa densità, le ellittiche si raggruppano in decine di centinaia di galassie, formando ammassi osservabili grazie alla loro emissione di raggi X, causata dalla presenza di una grande quantità di gas caldo. Una frazione della loro massa è formata invece dalla materia oscura.

Si trovano sul lato sinistro della sequenza di Hubble e sono classificate dalla lettera E, seguita dal valore dell'ellitticità $n = 10 \cdot (1 - \frac{b}{a})$, dove b/a è il rapporto tra la dimensione dell'asse minore e la dimensione dell'asse maggiore. Quindi risulta che le galassie E0 hanno $(b/a) = 1$ e sono rotonde, mentre le galassie E6 sono molto allungate.

Non sono mai state osservate galassie con $E > 7$, cosa dimostrabile anche da modelli di fluidodinamica, i quali spiegano che tale ellitticità rappresenta un livello di schiacciamento critico.

La forma apparente di una galassia E dipende quindi dalla direzione da cui è vista, poiché una E0, ad esempio, potrebbe avere realmente una struttura sferica, oppure essere un disco circolare se osservato direttamente dall'alto. Tuttavia con le nuove tecnologie è possibile individuare l'angolo di inclinazione rispetto alla linea di vista della Terra.

1.2 Galassie Lenticolari

Le galassie lenticolari (a forma di lente) si trovano sulla sequenza di Hubble nel punto in cui il ramo ellittico unisce i due delle spirali, poiché posseggono caratteristiche in comune con le due categorie.

Queste galassie, non avendo strutture evidenti, sembrano regolari come le ellittiche, ma hanno una struttura estesa simile a un disco e un rigonfiamento centrale luminoso. Alcune galassie lenticolari hanno una barra, in modo simile alle galassie a spirale e perciò sono chiamate galassie lenticolari barrate.

Sono generalmente identificate con S0n, distinguendosi in

- Lenticolari normali S0₁, S0₂ e S0₃: distinte in funzione del grado di assorbimento delle polveri del disco;
- Lenticolari barrate SB0₁, SB0₂ e SB0₃ in funzione della dimensione della barra.

1.3 Galassie a Spirale

Le galassie a spirale sono costituite da una concentrazione centrale di stelle nota come rigonfiamento, contenente il nucleo della galassia, che per la maggior parte dei casi è un buco nero supermassiccio e da un disco appiattito composto da due o più bracci, che possono essere avvolti più o meno strettamente formando appunto una forma a spirale.

I bracci sono regioni di formazione stellare attiva che contengono molte stelle calde, giovani, di colore blu e blu/bianche. Al contrario, il nucleo di una galassia a spirale è tipicamente di colore più rosso, il che indica la presenza di molte stelle vecchie. Le stelle e il materiale interstellare tendono a ruotare attorno al centro galattico con una velocità differenziale.

Le spirali differiscono inoltre in due sequenze parallele, definite in base alla relativa prominente del rigonfiamento, al grado in cui i bracci sono aperti o stretti e alla presenza o assenza di una caratteristica a forma di barra.

Inoltre, le galassie che hanno grandi rigonfiamenti presentano anche braccia lisce e strettamente avvolte, mentre quelle che hanno poco o nessun rigonfiamento hanno braccia

a spirale aperte e irregolari. Queste caratteristiche hanno portato alla classificazione delle spirali in Sa-Sb-Sc e SBa-SBb-SBc, dove “a” rappresenta un maggior avvolgimento dei bracci, che diminuisce con le lettere a seguire e dove “B” si riferisce alla presenza della barra.



Figura 2: A sinistra un esempio di galassia senza barra, Messier 81. A destra un esempio di galassia barrata, NGC 1073 di tipo SBc. Fonte: Wikipedia

Nelle galassie a spirale barrate i bracci partono dalle estremità della barra, mentre nelle spirali non barrate i bracci si rompono direttamente dalla regione del rigonfiamento.

Nei tipi Sd e SBd il rigonfiamento è molto piccolo o assente e la struttura diventa sempre più aperta e altamente risolta. I tipi Sm e SBm in *figura 1* rappresentano spirali di tipo Magellanic-Cloud, per molto tempo considerate irregolari ma che in realtà hanno una struttura a spirale asimmetrica e con nessuna componente di rigonfiamento.

Infine esiste una correlazione per le galassie a spirale tra la loro luminosità e la velocità con cui ruotano. Se si conosce la velocità di rotazione massima della galassia a spirale, ottenuta utilizzando la sua curva di rotazione¹, è possibile definire la sua luminosità intrinseca secondo la seguente relazione:

$$L \propto v_{max}^a$$

dove $a \simeq 3 - 4$.

Tale relazione, chiamata Tully - Fisher relation, permette poi di calcolare la distanza della galassia, confrontando la luminosità intrinseca e la magnitudine apparente:

$$d = \sqrt{\frac{L}{4\pi l}}$$

Le masse delle galassie a spirale sono ottenute dalla loro curva di rotazione. Assumendo poi che la maggior parte della massa si trova nel rigonfiamento, considerato sferico, quella totale può essere stimata dalla terza legge di Keplero:

$$M(R) = R v(R)^2 / G.$$

Quella della Via Lattea è stimata essere $6.82 \cdot 10^{11} M_{\odot}$.

¹ Paragrafo 3.2

1.4 Galassie irregolari

Esiste anche una classe di galassie irregolari, che non hanno una struttura definita, non essendo né spirale né ellittica.

Erano originariamente classificate come galassie “anonime”, prive di simmetria, e gli astronomi ritengono che le loro forme distorte possano essere causate dall'attrazione gravitazionale delle galassie vicine.

Appartenendo a circa il 20% delle galassie osservate, si possono suddividere nelle classi “Irr I”, ricche di gas e giovani stelle, e “Irr II”, piccole ellittiche ma irregolari e ricche di polvere.

È ormai noto tuttavia che molte irregolari ruotano e hanno strutture simili a barre nei loro dischi. Le loro proprietà sono così varie e la gamma delle luminosità totali è così grande che sono state oggetto di molte ricerche recenti.

Esempi di tale categoria di galassie sono le Grandi e Piccole Nubi di Magellano, irregolari che orbitano attorno alla Via Lattea ad una distanza di poche centinaia di migliaia di anni luce.

Le galassie irregolari che assomigliano alle Nubi di Magellano, ma prive di una struttura a spirale chiara, sono ora indicate come di tipo “Im” o “IBm”.

Capitolo 2

2. La struttura della Via Lattea

La Via Lattea è una galassia a spirale con una massa totale di circa $10^{12} M_{\odot}$. Il Sole è una delle diverse centinaia di miliardi di stelle che la compongono e il sistema solare si trova in uno dei bracci a spirale, precisamente in quello di Orione.

Anche la galassia più vicina, la Galassia di Andromeda (M31), è a spirale, distante circa 2,5 milioni di anni luce.

Collettivamente, l'ammasso più vicino a noi è chiamato Gruppo Locale, insieme che comprende oltre 70 galassie.

La Via Lattea è nota per essere una galassia a spirale barrata, di tipo SBbc. Il termine “bc” indica una struttura a spirale in cui si ha una maggiore prominenza del disco rispetto al bulge.

Tuttavia, poiché è impossibile avere una visione tridimensionale esterna della galassia, non ne conosciamo la sua struttura precisa, così come il numero e la posizione dei bracci a spirale e le caratteristiche della barra galattica. Tra le cause che precludono l'osservazione di stelle lontane dal piano galattico ci sono le grandi distanze degli oggetti celesti all'interno della galassia e l'estinzione causata dalla polvere interstellare. D'altro lato si ha però il vantaggio di poter analizzare da vicino le diverse regioni e le nubi di gas che costituiscono il disco.

Nella banda ottica la Via Lattea si presenta come una striscia luminosa divisa da una fascia scura, corrispondente alle polveri e al mezzo interstellare che assorbono la radiazione. Perciò altre bande, come infrarossa e radio, permettono di completare la definizione della sua struttura, evitando così il problema dell'estinzione e consentendo l'osservazione delle emissioni di nubi di idrogeno neutro tramite la riga 21 cm, utile anche per lo studio della cinematica della Galassia.

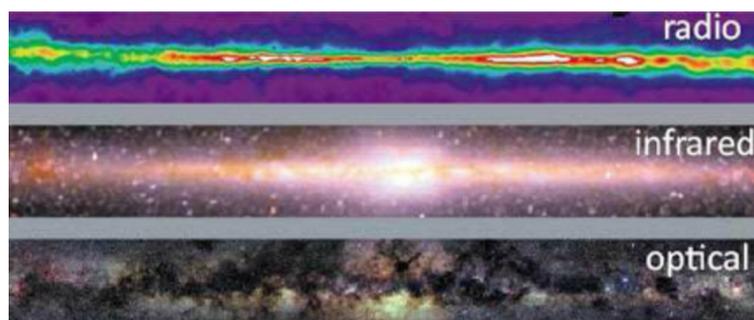


Figura 3: La Via Lattea osservata nelle bande radio, infrarossi e ottiche. Fonte: [10]

La forma a disco della Via Lattea è costituita principalmente dal rigonfiamento centrale, il bulge, che presenta una barra, e dal disco con bracci a spirale, che contiene la maggior parte della massa condensata nelle stelle, anche se circa il 10% di questa consiste in gas interstellare. Il diametro del disco è stimato essere di circa 105,000 anni luce, valore che fa aumentare l'idea della piattezza della Galassia. Le regioni citate sono soltanto la parte più evidente.

La struttura del disco presenta a sua volta un disco sottile detto “thin disk” e uno più spesso chiamato “thick disk”.

Ci sono inoltre indicazioni che la Via Lattea sia circondata da un alone sferico, composto da stelle antiche contenute in ammassi globulari ma dominato dalla materia oscura. Definire l'età della Via Lattea non è semplice, tuttavia è possibile stimarla per le singole stelle che la compongono, misurando l'abbondanza di elementi radioattivi a vita lunga e confrontandola con le stime delle abbondanze originarie. Gli ammassi globulari, essendo gli oggetti celesti più antichi, rappresentano un limite inferiore della sua età. La stella più antica mai osservata è la "Methuselah Star" (HD 140283), che si ritiene abbia circa 14,46 miliardi di anni.

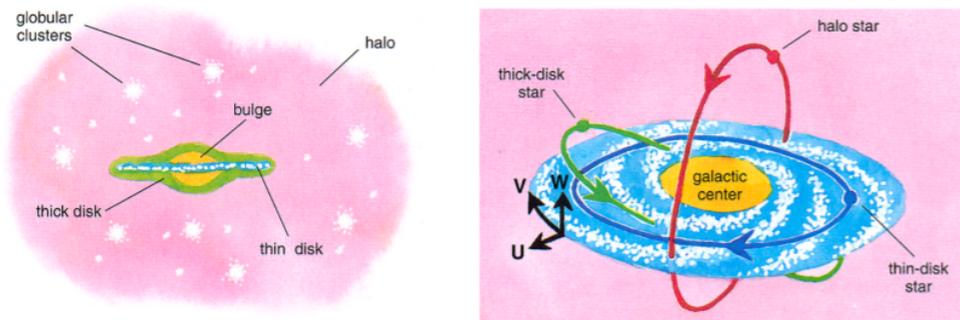


Figura 4: Anatomia della Via Lattea e le diverse orbite delle stelle, dove si nota il disco principale formato da bracci a spirale, la barra comprendente il bulge e il tutto circondato da un enorme alone sferico. La loro cinematica, forniscono una cruciale distinzione delle regioni della Galassia². Fonte: [4]

2.1 Bulge, barra e nucleo galattico

Il bulge rappresenta il rigonfiamento centrale della galassia, che si estende con un raggio di circa 6,500 anni luce, con una luminosità di circa $5 \cdot 10^9 L_{\odot}^3$, una massa di $2 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ e una leggera rotazione di circa 1° rispetto al piano galattico.

A causa dell'estinzione provocata dalle nubi di polvere del disco, tale regione viene osservata nella banda infrarossa.

E' principalmente costituito da stelle di Popolazione II⁴, tuttavia esiste una percentuale di stelle luminose e giganti, migrate dall'esterno per via della forte attrazione gravitazionale.

Il bulge è attraversato da una barra costituita da stelle molto vecchie, dalla quale partono i bracci a spirale che compongono il disco galattico.

Le osservazioni, mostrano una distorsione della forma della barra, spiegata come un effetto ottico, nel quale il rigonfiamento dell'estremità più vicina appare più grande rispetto al lato opposto.

Nel 2010 inoltre, le osservazioni di McWilliam e Zoccali riportano una distribuzione di magnitudo a doppio picco degli RCG (Red Clump Giants), gruppo di stelle giganti, considerate molto abbondanti e buone candele standard per tracciare la barra.

²Le stelle del disco sottile tendono ad avere un'alta velocità di rotazione ma una bassa velocità verticale. Le stelle del disco spesso hanno velocità verticali leggermente più elevate e quasi nessuna velocità di rotazione.

³ All'incirca il 30% della luminosità totale della Via Lattea.

⁴ Stelle antiche, poco massicce e povere di elementi pesanti per via della loro formazione nell'universo primitivo, dove la percentuale di elementi pesanti era bassa.

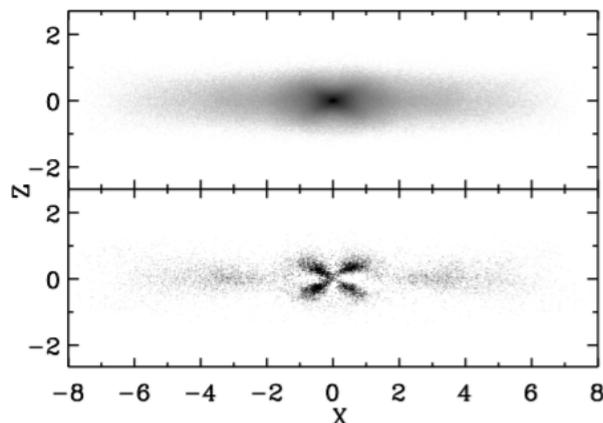


Figura 5: Struttura a forma di X della barra, con vista laterale del modello nell'immagine superiore e il residuo dopo aver sottratto la luce di fondo nell'immagine inferiore. L'unità di lunghezza è di $R = 1,9$ kpc. Fonte: [3]

Ciò può essere spiegato con una struttura a forma di “X” verticale della barra/bulge, che è più simile a una forma ovalizzata se non si considera l’adattamento delle immagini.

La nostra conoscenza del centro della Via Lattea si basa principalmente su osservazioni radio e infrarosse. Nella regione ottica la vista al centro è bloccata dalle nuvole scure nel braccio a spirale del Sagittario, che si trova a circa 2 kpc da noi.

Man mano che ci si avvicina al nucleo galattico, la densità stellare aumenta fino a raggiungere un picco centrale, mentre il disco presenta un foro di circa 3 kpc dove all’interno si trova un denso disco di gas nucleare di raggio circa 1.5 kpc di idrogeno neutro, dove tuttavia la maggior parte della sua massa è concentrata entro i 300 pc dal centro.

Tale regione comprende il 5% della massa molecolare della Via Lattea, confinata dalla pressione del caldo gas circostante che ha una temperatura di circa 10^8 K, e che può quindi espandersi causando un vento galattico.

All’interno del nucleo è presente un denso ammasso stellare osservato nell’infrarosso che, nonostante l’elevata luminosità, dovrebbe riferirsi a un buco nero supermassiccio, “Sgr A*”, che si trova in una posizione con una densità più alta di qualsiasi altro oggetto osservato nel disco galattico.

In particolare, il miglior modello per la determinazione delle orbite delle stelle nell’ammasso centrale considera una distribuzione di massa estesa e una massa puntiforme di circa $3 \cdot 10^6 M_{\odot}$. Dato che la dimensione di Sgr A* misurata con l’interferometria è meno di 10 AU, la spiegazione attualmente accettata per giustificare la compattezza di tale struttura è che vi sia un buco nero.

2.2 Alone galattico

L’alone galattico è una componente approssimativamente sferica che si estende fino a 50 kpc, in contrasto con la forma piatta del disco ed è la parte più antica della Via Lattea.

E’ costituito principalmente da stelle appartenenti alla Popolazione II e da materia oscura. L’alone contiene pochissima materia interstellare e le sue stelle sono vecchie, molto povere di metalli, con una massa totale di circa $10^9 M_{\odot}$. Le loro orbite non si dispongono obbligatoriamente sul piano galattico e possono essere molto eccentriche.

Si possono distinguere diverse componenti dell'alone:

- Alone stellare;
- Alone gassoso;
- Alone di materia oscura.

Infatti oltre all'alone stellare sono state fornite prove dell'esistenza di un alone gassoso costituito da una grande quantità di gas molto caldo, rilevabile dai raggi X emessi per Bremsstrahlung e con una massa confrontabile con la massa della stessa Via Lattea estesa migliaia di anni luce oltre l'alone stellare.

2.3 Disco e bracci a spirale

Il disco è caratteristico delle galassie a spirali, chiamate appunto anche "galassie a disco". Tale struttura è composta principalmente da stelle, polvere e gas organizzati nei bracci.

Il disco della Via Lattea si distingue in disco sottile (thin disk), la sede dei bracci a spirale, che si espande fino a circa 1,000 anni luce sopra e sotto il piano galattico e per circa 3,500 anni luce su entrambi i lati del piano⁵ e disco spesso (thick disk), con una massa totale di circa $8 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ e una luminosità di circa $1.5 \cdot 10^{10} L_{\odot}$.

Il disco spesso si estende con 30 kpc di diametro ed è composto da circa il 5% delle stelle di Popolazione II dell'intero disco.

Il restante 95% delle stelle costituisce invece il disco sottile, essendo l'ambiente galattico con il più alto tasso di formazione stellare, che si estende nell'asse verticale per circa 300-400 pc e per circa 2.5 - 4.5 kpc nella direzione del raggio.

Tali stelle, che fanno parte prevalentemente della Popolazione I⁶ e di classe spettrale O-B, si muovono circolarmente nel piano galattico, insieme a materiale interstellare che ruota in maniera simile.

Allontanandoci dal piano galattico, verticalmente e orizzontalmente, la densità numerica delle stelle diminuisce in maniera esponenziale come⁷ $n(R) \propto e^{-R/h}$, aumenta invece il rapporto tra le stelle vecchie e quelle giovani.

Indicatori importanti di distanza nel disco sono rappresentati dalle stelle Cefeidi, stelle giovani molto luminose con variazioni di luminosità periodiche che permettono di determinare le distanze e gli ammassi aperti, data la loro presenza massiccia nelle galassie a disco.

Per delineare la struttura precisa del disco, dovrebbe essere rilevato un gran numero di traccianti dei bracci a spirale, con distanze determinate in modo accurato e con la più alta luminosità possibile. Regioni di formazione stellare massicce, regioni HII⁸, associazioni OB⁹ e le nubi molecolari giganti (GMC)¹⁰ ad esempio delineano la loro posizione nei bracci e per questo sono state ampiamente utilizzate. Questo perché sono regioni molto

⁵ Profilo sottile che tende però a ispessirsi verso l'esterno a causa delle interazioni mareali con galassie nelle vicinanze.

⁶ Stelle giovani con alta percentuale di metalli pesanti.

⁷ h è la lunghezza di scala del disco, con il valore di circa 3 kpc.

⁸ Regione molto calda di idrogeno ionizzato che si trova in un background di idrogeno neutro più freddo. Si ha emissione nel continuo e righe di ricombinazione.

⁹ Gruppo di stelle giovani, calde e massicce di classe spettrale O e B che emettono luce ultravioletta che ionizzando forma regioni HII.

¹⁰ Addensamento di mezzo interstellare formato da H2.

luminose e quindi ben rilevabili su tutto il piano galattico e con parametri di distanza facilmente determinabili.

Le regioni sopraccitate sembrano essere concentrate in tre bande allungate, interpretate come porzioni di tre bracci a spirale, come riportato nella *figura 6*.

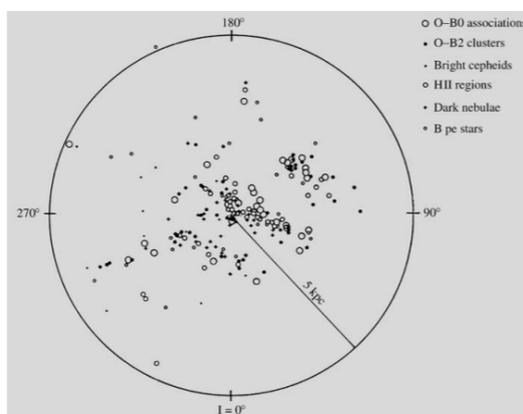


Figura 6: Distribuzione di vari oggetti sul piano galattico; si notano tre principali concentrazioni nel braccio di Sagittario (in basso), il braccio locale vicino al Sole e il braccio di Perseo (in alto). Fonte:[8]

Risultati derivati da altri studi di parallasse, invece, individuano oltre duecento sorgenti maser associate a regioni di formazione stellare su ampie porzioni della Via Lattea, osservando almeno sei segmenti dei bracci a spirale. Altre considerazioni sulla forma della nostra galassia risultano desumibili dall'osservazione di galassie nelle immediate vicinanze che mostrano simili caratteristiche, come ad esempio "M31", la galassia di Andromeda e "M33", la sua galassia satellite.

2.4 Gas coronale galattico della Via Lattea

Nel 1956 Lyman Spitzer dimostrò che la Via Lattea è circondata da un ampio involucro di gas molto caldo, distribuito attraverso l'intera galassia, estendendosi per diverse migliaia di parsec dal piano galattico.

Data la sua bassa densità dell'ordine di 10^{-3} atomi/cm³, più bassa della densità media del piano galattico, di 1 atomo/cm³, rappresenta una sorta di "mare di fondo", da cui forme più dense della materia interstellare, come l'idrogeno neutro e le nubi molecolari, si elevano come isole.

A seguito di successivi programmi scientifici, si trovarono le prove di questo tipo di gas detto "coronale galattico", data l'analogia con la corona solare.

Il satellite Copernicus osservò ad esempio righe di emissione di ossigeno cinque volte ionizzato (O VI), azoto quattro volte ionizzato (N V) e carbonio tre volte ionizzato (C IV). La formazione di queste linee richiede un'elevata temperatura (100.000-1.000.000 K), indicata anche dall'allargamento delle stesse.

Dedotta come una forma di materia comune nelle altre galassie, il gas coronale e la sua energia hanno probabilmente origine da esplosioni di supernova; quando una di queste esplose, forma una bolla calda nel mezzo circostante, che poi si espande e si fonde con bolle delle supernove vicine.

Infine, anche i venti stellari delle stelle calde potrebbero fornire parte dell'energia al gas coronale.

Capitolo 3

3. Cinematica della Via Lattea

3.1 Rotazione Differenziale e formule di Oort

Le osservazioni dei moti delle stelle e del gas che compongono la Via Lattea propongono un modello di rotazione generale attorno a un asse normale al piano galattico, di natura differenziale, che si traduce in una velocità angolare di rotazione dipendente dalla distanza dal centro galattico. Quindi la Via Lattea non ruota come un corpo rigido, ma con la velocità di rotazione che diminuisce con l'aumentare del raggio.

Gli effetti di tale rotazione sono stati studiati dall'astronomo Jan H. Oort.

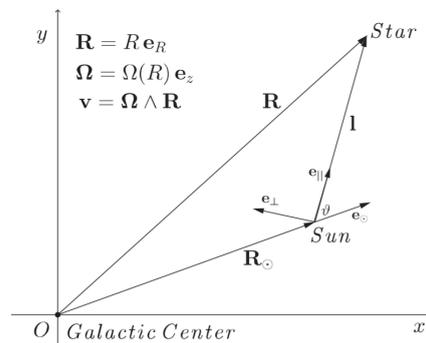


Figura 7: Sistema di riferimento con scomposizione vettoriale delle velocità relative osservate da un punto su un'orbita circolare in un disco infinitamente sottile e formato da orbite perfettamente circolari. Fonte:[9]

E' possibile trascurare, in prima approssimazione, il moto delle stelle in direzione radiale e verticale (cioè perpendicolare al disco) e assumere orbite perfettamente circolari, collocate nel disco della galassia infinitamente sottile (tutte le stelle girano nel piano xy).

Si indica con $\Omega(R) = \Omega(R) e_z$ la velocità angolare delle stelle nel disco a una distanza $R = ||R||$ dal centro, con e_z il vettore unitario diretto lungo l'asse z e la velocità delle orbite circolari di raggio R sia data da $v = \Omega \times R$.

Il Sole si trova a $R_{\odot} = R_{\odot} e_{\odot}$ dal centro della galassia, dove e_{\odot} è il vettore unitario nel piano galattico rivolto in verso opposto al centro galattico, per cui $\Omega(R_{\odot}) = \Omega_{\odot}$. Così le velocità del Sole e di una generica stella attorno al centro galattico sono date da:

$$v_{\odot} = \Omega_{\odot} e_z \times R_{\odot}; \quad v_{\star} = \Omega(R) e_z \times R.$$

Introducendo inoltre $l = R - R_{\odot}$, si ricavano due ulteriori vettori paralleli e perpendicolari:

$$e_{\parallel} = l / ||l||; \quad e_{\perp} = e_z \times e_{\parallel}$$

Così che la velocità relativa della stella rispetto al Sole

$$V = v_{\star} - v_{\odot} = \Omega \times l + (\Omega - \Omega_{\odot}) \times R_{\odot}$$

si possa scomporre nella componente parallela e perpendicolare;

$$V_{\parallel} = \langle V, e_{\parallel} \rangle; V_{\perp} = \langle V, e_{\perp} \rangle.$$

Le espressioni esatte per le due componenti per la rotazione differenziale di un disco sono date dopo semplici passaggi vettoriali da

$$V_{\parallel} = (\Omega - \Omega_{\odot})R_{\odot} \sin \vartheta; V_{\perp} = \Omega l + (\Omega - \Omega_{\odot})R_{\odot} \cos \vartheta.$$

Considerando ora l' approssimazione di campo vicino, dove $l/R_{\odot} \ll 1$, l'espansione di Taylor della funzione $\Omega(R)$ è

$$\Omega(R) = \Omega_{\odot} + \langle \nabla \Omega, l \rangle + O(l^2)$$

da cui $\nabla \Omega_{R=R_{\odot}} = \frac{d\Omega}{dR_{=R_{\odot}}} e_{\odot}$ e quindi $\Omega(R) = \Omega_{\odot} + \Omega'_{\odot} l \cos \vartheta$.

Si può ora riscrivere l'espressione per la componente della velocità parallela

$$v_{\parallel} = l A \sin(2\vartheta)$$

ricavando la prima costante di Oort:

$$A = \frac{\Omega'_{\odot} R_{\odot}}{2}$$

La componente perpendicolare può invece essere riscritta come

$$v_{\perp} = \Omega_{\odot} l + \Omega'_{\odot} R_{\odot} l \cos(2\vartheta) = \Omega_{\odot} l + \Omega'_{\odot} R_{\odot} l \left(\frac{1 + \cos 2\vartheta}{2} \right)$$

ottenendo la seconda costante di Oort:

$$B = \Omega_{\odot} + \frac{\Omega'_{\odot} R_{\odot}}{2}$$

avendo così $B = \Omega_{\odot} + A$.

Le costanti di Oort possono essere inoltre riscritte in termini di velocità circolare invece che angolare, dato che $\Omega(R) = v(R)/R$:

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{dR} - \frac{v}{R} \right)_{R=R_{\odot}}; B = \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{dR} + \frac{v}{R} \right)_{R=R_{\odot}}$$

Sulla base di questo tipo di analisi, Oort stabilì che i moti osservati delle stelle indicavano una rotazione differenziale della Via Lattea.

Prendendo in considerazione un ampio set di dati osservativi, l'International Astronomical Union (IAU) ha confermato gli attuali valori fissati per le costanti di Oort:

- $A = 15 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$;

- $B = -12 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$.

Le costanti di Oort ci permettono di determinare la curva di rotazione, ma sono valide solo però per distanze brevi, in prossimità del Sole. Uno studio più accurato della curva viene effettuato con le osservazioni delle emissioni a 21 cm.

3.2 Curva di rotazione della Galassia

La rotazione differenziale della galassia può essere utilizzata per determinare in maniera indiretta la posizione di una sorgente radio, come una regione HI. Tale radiazione, osservata con la riga a 21 cm, non è assorbita in maniera rilevante dalla polvere interstellare, perciò la sua osservazione può essere utile per mappare la struttura della Via Lattea su larga scala.

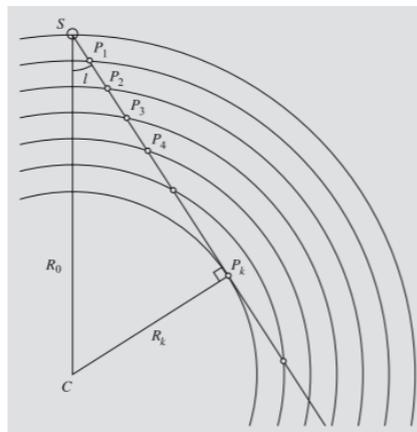


Figura 8 : Nubi di HI (P1,P2...) viste nella stessa direzione a distanze diverse. Fonte:[8]

Se si considerano le nubi di HI come cerchi con centro in C si osserva che la massima velocità angolare lungo la linea di vista, poiché questa aumenta verso l'interno, si ha nel punto P_k , dove la linea di vista è tangente al cerchio:

$$v_{r,max} = R_k(\omega - \omega_k)$$

dove $R_k = R_0 \sin(l)$.

La riga 21 cm che si osserva dall'emissione di HI è dovuta al fatto che elettrone e protone posseggono un momento angolare intrinseco chiamato spin. Il cambiamento della configurazione di tale caratteristica, che può essere definita parallela o antiparallela, porta a una transizione di splittamento iperfine dello stato fondamentale dell'atomo.

La probabilità di transizione di questo processo è data dal coefficiente di Einstein per l'emissione spontanea, dal valore di circa $A = 2.85 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$, che indica una transizione fortemente proibita con un lungo tempo di decadimento di 10^7 anni.

Attraverso osservazioni a varie longitudini galattiche e assumendo la presenza di bracci a spirale continui, è possibile mappare la distribuzione dell'idrogeno neutro nel piano galattico, che sembra si concentri nei bracci a spirale.

Per ottenere le distanze dalle nubi di gas si deve conoscere la curva di rotazione, ovvero la velocità circolare in funzione del raggio galattico, che viene prodotta conoscendo la

velocità radiale¹¹ della galassia nei vari punti, ottenuta con l'osservazione della riga di HI, che rappresenta il miglior metodo, poiché la sua distribuzione si estende ben oltre la materia visibile.

Per ottenere la curva di rotazione della galassia a spirale, è necessario considerare la distribuzione di massa delle due principali componenti, il bulge e il disco galattico.

Per il primo si considera un modello sferico, a densità costante, mentre per il disco di densità superficiale $\sigma(r)$, la massa si può scrivere come

$$M = \int_0^r 2\pi r \sigma(r) dr.$$

A grandi distanze, nella parte più esterna della galassia, la massa può essere considerata puntiforme.

Nel grafico della curva di rotazione calcolata in *figura 9* si nota quindi come la parte centrale del bulge ruoti con una velocità angolare proporzionale al raggio come $v(r) \propto r$, che diventa indipendente dal raggio ($v(r) = costante$).

Oltre a una determinata distanza quindi, la velocità dovrebbe decrescere proporzionalmente alla radice quadrata del raggio (curva kepleriana con $v \propto r^{-1/2}$), poiché si considera la massa concentrata al centro. Tuttavia le curve di rotazione osservate non presentano tale andamento ma, tendono ad un valore asintotico, costante, nelle zone più esterne, come mostrato nella *figura 9*.

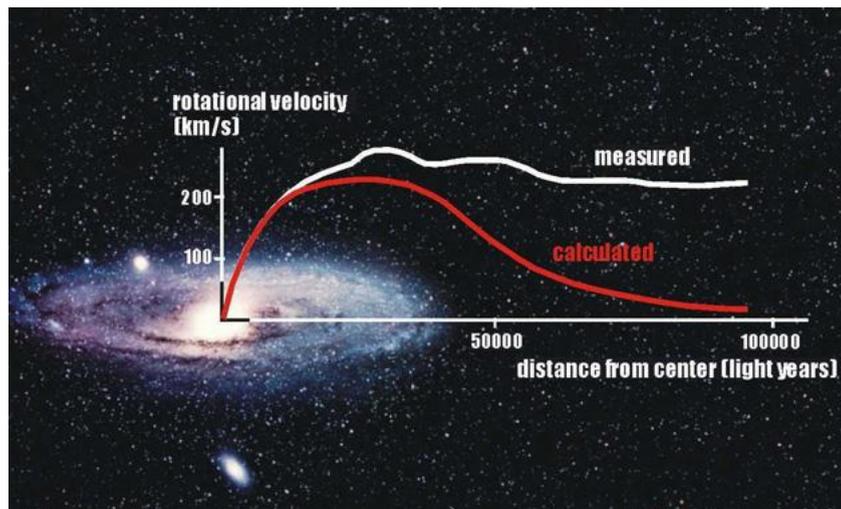


Figura 9: Curva di rotazione della Galassia, osservata e misurata. Si noti come il grafico misurato rimane costante con l'aumentare della distanza dal centro galattico. Fonte:[11]

La spiegazione potrebbe essere quindi data dalla presenza di un'ulteriore massa non visibile, la materia oscura, che interagisce gravitazionalmente, non emette radiazione elettromagnetica e permetterebbe di giustificare la curva di rotazione misurata.

Le osservazioni di quest'ultima nelle zone più esterne spiegano inoltre che la velocità di rotazione potrebbe ricominciare a salire, suggerendo che la massa della Galassia potrebbe essere fino a dieci volte più grande di quanto si pensi.

¹¹ La velocità radiale v_r viene ottenuta con l'effetto doppler, a partire quindi dallo spostamento Doppler sulla riga, con la relazione $\Delta v/v = -v_r/c$.

3.3 Teoria dell'onda di densità

A causa della rotazione differenziale, poiché la materia più vicina al centro della galassia ruota più velocemente rispetto alle posizioni più esterne, i bracci, se considerati materiali, dovrebbero avvolgersi sempre di più col passare del tempo e con l'aumentare del numero di rotazioni, come riportato in *figura 10*.

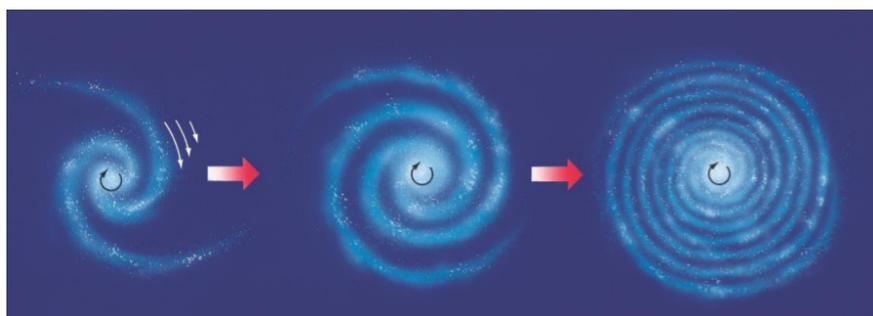


Figura 10: Winding dilemma: se i bracci a spirale fossero considerati “materiali”, si riavvolgerebbero, distruggendosi entro poche rotazioni. Fonte:[12]

Tale problema viene risolto con la teoria delle onde di densità, proposta nel 1964 da Frank Shu e Chia-Chiao. Si considera una particolare velocità angolare dei bracci, intesi appunto come regioni di densità, più lenta della velocità differenziale delle stelle del disco galattico nelle zone più interne. Le stelle e il mezzo interstellare che entrano nell'onda rallentano, per poi accelerare una volta uscite da essa. Le stelle che si trovano nella parte esterna invece procedono più lentamente, venendo sorpassate dalle onde. Nella zona centrale del disco è presente una posizione nella quale la materia del disco e l'onda hanno la stessa velocità; tale distanza dal centro si chiama “raggio di corrotazione”. Questo modello permette di giustificare il mantenimento della struttura a spirale della galassia.

Si determina quindi che la creazione dei bracci è data dalla formazione di solchi in cui il materiale interstellare rimane “intrappolato”, comprimendosi con l'arrivo di ulteriore gas portato dalla rotazione della galassia. Le perturbazioni del potenziale gravitazionale così causate si osservano come onde di densità, che mostrano massimi relativi dove si osservano oggi le spirali.

Il meccanismo nasce dal fatto che le stelle non compiono orbite perfettamente circolari, ma ellittiche e che subiscono la precessione del perielio, a causa delle interazioni gravitazionali con il resto della galassia. Tali orbite, differenziali, subiscono degli spostamenti angolari a seconda della distanza dal centro galattico, e sovrapponendosi, provocano zone con maggiore densità di stelle, generando le onde di densità.

Ciò spiega il perché nei bracci di spirale si trovano oggetti giovani, come nuvole molecolari, regioni HII e giovani stelle molto luminose: nel momento in cui il gas attraversa l'onda di densità, esso viene fortemente compresso con un conseguente collasso delle nubi di gas causato dalla gravità interna, determinando così la formazione di nuove stelle.

Bibliografia

1. Ronald Buta, “Galaxies: Classification” From Encyclopedia of Astronomy & Astrophysics P. Murdin;
2. Xu, “The local spiral structure of the Milky Way” , et al. Sci. Adv. 2016;
3. J. Shen, X. Zheng, “The Bar and Spiral Arms in the Milky Way: Structure and Kinematics”, Research in Astron. Astrophys. 2020 Vol. 20;
4. C. Chiappini, “The Formation and Evolution of the Milky Way”, From American Scientist, November/December 2001, pp. 506-515;
5. T. Theuns, “Stars and Galaxies” , Institute for Computational Cosmology Ogden Centre for Fundamental Physics Durham University 2007-2008;
6. Mark J. Reid, “Structure and Kinematics of the Milky Way”, Astrophysical Masers: Unlocking the Mysteries of the Universe, Proceedings IAU Symposium No. 336, 2017;
7. L.G. Hou, J.L. Han, “The observed spiral structure of the Milky way”, Astronomy & Astrophysics manuscript 2014;
8. H. Karttunen, P. Kröger, “Fundamental Astronomy”, Fifth Edition, Springer;
9. L. Ciotti, “Introduction to stellar dynamics”, Cambridge University Press, 2021;
10. H. Lee, E. Schneider, “Using astronomical photographs to investigate misconceptions about galaxies and spectra: Question development for clicker use”, Physical review special topics 11, 2015.
11. Danilo Babusci & Fabio Bossi, Il problema della materia oscura;
12. <https://pages.uoregon.edu/>.