

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

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

Struttura e cinematica della Via Lattea

Tesi di Laurea

Presentata da:
Francesco Pizzichemi

Relatore:
**Chiar.mo Prof.
Daniele Dallacasa**

Anno Accademico 2018/2019

Sommario

Questo elaborato si pone come obiettivo di fornire una panoramica delle principali caratteristiche della galassia in cui si trova il nostro Sistema Solare: la Via Lattea. Al fine di comprendere a fondo le particolarità di quest'ultima, nel capitolo 1 si descrivono le peculiarità dei vari tipi di galassie, concentrandosi sulla morfologia e sulla composizione. Nel capitolo 2 si approfondisce la struttura della Galassia, analizzando gli elementi che ne costituiscono lo scheletro. Infine, nel capitolo 3, si esamina la cinematica della Via Lattea, partendo dai dintorni solari per costruire la curva di rotazione caratteristica e fornendo una prima evidenza della presenza di materia oscura.

Indice

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | Classificazione delle galassie | 2 |
| 1.1 | Galassie ellittiche | 3 |
| 1.2 | Galassie a spirale | 4 |
| 1.3 | Galassie lenticolari e irregolari | 4 |
| 2 | Struttura della Via Lattea | 5 |
| 2.1 | Caratteristiche generali | 5 |
| 2.2 | Il disco galattico | 6 |
| 2.2.1 | Thin disk | 6 |
| 2.2.2 | Thick disk | 6 |
| 2.3 | Bulge | 7 |
| 2.4 | Alone | 7 |
| 3 | Cinematica della Via Lattea | 8 |
| 3.1 | Costanti di Oort | 9 |
| 3.2 | Curve di rotazione | 10 |
| 3.2.1 | Curva rigida | 10 |
| 3.2.2 | Curva Kepleriana | 10 |
| 3.2.3 | Curva di una sfera omogenea | 11 |
| 3.3 | Curva di rotazione della Via Lattea | 12 |
| 3.3.1 | Determinazione della curva | 13 |
| 3.3.2 | Winding dilemma | 15 |

Capitolo 1

Classificazione delle galassie

Il primo lavoro scritto di classificazione morfologica delle galassie si deve all'astrofisico statunitense Edwin Powell Hubble. Una delle proprietà più importanti della cosiddetta *sequenza di Hubble*, mostrata in figura 1.1, è quella di avere altre caratteristiche collegate alla morfologia di una galassia, come le popolazioni stellari e la presenza di gas. In primo luogo le galassie¹ furono divise in regolari e irregolari. Le prime si distinguevano in *ellittiche*, chiamate E_n ² e *spirali*, a loro volta suddivise in *normali* (Sa, Sb, Sc) e *barrate* (SBa, SBb, SBc). Successivamente furono aggiunte le galassie *lenticolari* $S0$ e $SB0$ come punto di incontro tra le ellittiche e le spirali.

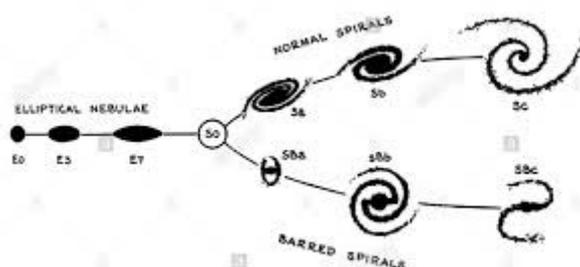


Figura 1.1: Sequenza di Hubble, chiamata anche diagramma a diapason o tuning-fork. Crediti: E. P. Hubble, "The Realm of the Nebulae", 1936, Yale University Press.

¹All'epoca si credeva che fossero nebulose all'interno della nostra Galassia. Fu proprio Hubble a comprendere che si trattava di oggetti più lontani, da lui definiti *nebulose extragalattiche*([8])

²n è un numero intero da 0 a 7 che dipende dalla forma della galassia, come si vedrà più avanti.

1.1 Galassie ellittiche

Le galassie ellittiche sono sistemi stellari che non contengono gas freddo o polveri e non presentano un disco stellare. L'assenza di gas freddo, necessario per la formazione di nuove stelle, correla con l'età delle stelle in questo tipo di galassie: non è presente formazione stellare, quindi le stelle sono principalmente di Popolazione II³.

Le galassie ellittiche sono così chiamate a causa delle loro linee isofotali⁴ approssimabili a ellissi. Come detto precedentemente, sono indicate da una E accompagnata da un numero intero n strettamente collegato al valore di ellitticità. Questa può essere trovata stimando il valore dei due semiassi a e b , da cui si ricava n moltiplicando per 10 e omettendo la parte decimale:

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

Da qui deriva la suddivisione in otto classi, da E_0 (praticamente sferica) a E_7 (che corrisponde a un rapporto tra i semiassi di circa 3:1). Non si osservano galassie più schiacciate di E_7 a causa di instabilità dinamica.

La determinazione di diametro e dimensioni per un oggetto diffuso, senza confini netti, risulta essere molto difficile, perciò l'astronomo francese Gérard de Vaucouleurs introdusse il raggio effettivo R_e , ovvero la distanza entro la quale è contenuta metà della luminosità totale ([7]). Questa definizione offre il grande vantaggio di determinare una caratteristica intrinseca delle galassie. La classificazione di Hubble è basata sull'ellitticità delle isofote vicino al raggio effettivo. In molte galassie le isofote diventano più schiacciate a grandi distanze dal centro: ad esempio, M87 è classificata come E_0 ma il rapporto tra gli assi è 0.5 nelle regioni esterne.

Le dimensioni tipiche delle galassie ellittiche variano in un intervallo molto ampio: mentre le comuni nane hanno diametro di circa 0.5 kpc⁵, le giganti arrivano ad estendersi su centinaia di kpc. Questo porta a disporre di un'enorme varietà anche per quanto concerne la massa e la luminosità: le più piccole contengono 10^7 masse solari, le più massive raggiungono $10^{13} M_\odot$ e sono comprese tra 10^5 e 10^{13} luminosità solari⁶.

³Le stelle si dividono in due o tre popolazioni: quelle di Popolazione II sono relativamente vecchie e povere di metalli rispetto a quelle di Popolazione I.

⁴Un'isofota è una linea che collega punti di uguale luminosità.

⁵Il parsec è un'unità di misura astronomica che corrisponde a $3,09 \cdot 10^{18} \text{ cm}$

⁶Successivamente indicata con L_\odot , ha il valore di $3,90 \cdot 10^{33} \text{ erg/s}$; la massa del sole, denotata con il simbolo M_\odot , è pari a $1,989 \cdot 10^{33} \text{ g}$

1.2 Galassie a spirale

Queste galassie presentano un disco diviso in strati: uno strato sottile (*thin disk*) dell'ordine di 100 pc divide in due uno strato più grosso (*thick disk*) di circa 1 kpc. Al centro del disco si trova un rigonfiamento detto *bulge*, avente da solo caratteristiche simili a quelle di una galassia ellittica, da cui si originano dei *bracci* di spirale. Il disco è circondato da un *alone* quasi sferico, che ha una densità molto minore.

In generale le spirali contengono grandi quantità di polvere interstellare e gas freddo. Vengono classificate a seconda dell'esistenza o meno di una struttura a forma di barra che attraversa il bulge. Sono inoltre distinte in base alla prominente relativa di quest'ultimo rispetto al disco e dell'avvolgimento dei bracci. Le spirali di tipo Sa hanno un bulge molto grande relativamente alla dimensione del disco e bracci molto avvolti; quelle di tipo Sc hanno un bulge piccolo con bracci aperti e un maggior contenuto di gas freddo.

All'interno di una galassia si trovano diverse popolazioni stellari: le stelle giovani di popolazione I sono concentrate nel disco, che è quindi sito di formazione stellare e al quale attribuiscono il tipico colore blu; le stelle di popolazione II, che sono meno massive, più fredde ma più longeve, occupano il bulge e l'alone. Le spirali hanno dimensioni che oscillano da 5 a 100 kpc, masse comprese tra 10^9 e $10^{12}M_{\odot}$ e luminosità che variano da 10^8 a $10^{11}L_{\odot}$.

1.3 Galassie lenticolari e irregolari

Lenticolari Sono considerate galassie intermedie tra le ellittiche e le spirali. Come le ellittiche non contengono gas freddo e quindi non c'è traccia di recente formazione stellare. Non mostrano bracci, ma hanno un disco, un alone, un bulge solitamente polveroso e qualche volta una barra. Gli studi di questi oggetti suggeriscono che potrebbero provenire da galassie a spirali impoverite di gas, esaurito nella formazione stellare.

Irregolari Galassia irregolare è il nome generico attribuito a quelle galassie che non si adattano a nessuna delle categorie sopra elencate: non hanno forma né struttura definita, contengono sia stelle giovani che vecchie, una significativa quantità di gas e solitamente manifestano nodi luminosi di formazione stellare. Tipicamente sono più piccole e meno luminose delle galassie a spirali: si estendono fino a dimensioni di 10 kpc e masse di $10^{10}M_{\odot}$, raggiungendo al massimo 10^9L_{\odot} . Gli esempi più conosciuti sono le Nubi di Magellano, due piccole galassie satellite della Via Lattea.

Capitolo 2

Struttura della Via Lattea

La Via Lattea è la Galassia a cui appartiene il nostro sistema solare; venne chiamata così a causa del suo aspetto osservato da Terra, una scia bianca e luminosa di stelle non distinguibili ad occhio nudo. Il Sole si trova sul piano di rotazione galattico, a una distanza di circa 8 kpc dal centro. Poiché ci troviamo all'interno di essa, non è facile stimare con precisione le caratteristiche. La sua struttura è rappresentata in figura 2.1.

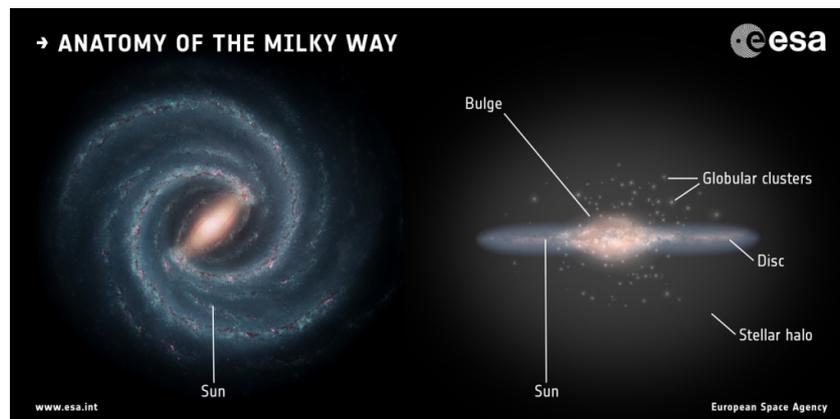


Figura 2.1: Struttura della Via Lattea. Crediti: ESA.

2.1 Caratteristiche generali

La Galassia è una spirale barrata classificata come SBbc, ovvero una via di mezzo tra SBa e SBc. Le sue dimensioni sono ancora oggetto di dibattito, negli ultimi anni si ritiene che il diametro sia intorno ai 50 kpc. La massa totale è di $10^{12} M_{\odot}$, di cui la componente stellare è circa $6 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ e quella gassosa $5 \cdot 10^9 M_{\odot}$. La luminosità nell'ottico risulta $3 \cdot 10^{43}$ erg/s. La distribuzione di densità stellare cade esponenzialmente allontanandosi

dal centro galattico, sia lungo il disco che lungo la normale ad esso; considerando l'altezza di scala h , cioè la distanza alla quale la densità decresce di un fattore $1/e$, si ottengono le relazioni:

$$\begin{aligned}\rho(R) &= \rho(0)\exp\left(-\frac{R}{h_R}\right) \\ \rho(z) &= \rho(0)\exp\left(-\frac{z}{h_z}\right)\end{aligned}\tag{2.1}$$

2.2 Il disco galattico

Il disco galattico si suddivide in due strati: un disco interno sottile chiamato *thin disk* circondato da uno più spesso, il *thick disk*. Come si vedrà in dettaglio nel capitolo 3, la rotazione avviene in modo differenziale. Su tutto il disco è diffuso il Warm Neutral Medium¹, una delle quattro fasi del mezzo interstellare.

2.2.1 Thin disk

Il thin disk contiene la componente stellare più massiva della Galassia e ospita circa l'80% della materia barionica totale. La sua lunghezza di scala è circa 100 pc. Questo strato include una grandissima quantità di gas e polvere, pertanto è tuttora sito di formazione stellare; per questo motivo, le stelle tendono ad essere relativamente giovani, con un'età media attorno ai 6 Gyr e una metallicità non bassa. Nell'ottico la luce stellare viene nascosta dall'effetto di estinzione della polvere. I bracci della spirale giacciono all'interno di questa componente: qui si trova il Warm Ionized Medium² circondato da Cold Neutral Medium³ in nubi molecolari giganti, luoghi di nascita di nuove stelle e pianeti.

2.2.2 Thick disk

Si ritiene che questo disco non esista in tutte le galassie. Contiene il 10% della massa stellare della Galassia e ha una lunghezza di scala dell'ordine di 1000 pc. Le stelle qui presenti hanno più di 12 Gyr e sono maggiormente povere di metalli rispetto a quelle del disco sottile. Per confronto, la metallicità delle stelle del thick disk ha un valore medio pari a 1/4 di quella solare, mentre nel thin disk varia da 1/3 a 3 volte rispetto a quella del Sole.

¹WNM, si trova a temperature dai 10^2 ai 10^4 K, con densità dell'ordine di 1 particella/cm³

²WIM, la temperatura è 10^4 K e densità maggiori di 1 particella/cm³

³CNM, a temperature bassissime con densità che vanno da 10 a 10^3 particelle/cm³

2.3 Bulge

Consiste in una concentrazione sferica di stelle con raggio dell'ordine dei kpc. Contribuisce alla massa stellare con un fattore di $10^{10}M_{\odot}$ corrispondente al 25% della luminosità totale della Galassia. Le stelle che vi si trovano hanno un'età maggiore dei 9 Gyr e metallicità che mediamente risulta essere circa la metà di quella solare: pur avendo età simili, queste stelle sono relativamente ricche di metalli rispetto a quelle dell'alone. All'interno del bulge si trova Hot Ionized Medium⁴. Le osservazioni degli oggetti nelle zone circostanti al centro galattico indicano la probabile esistenza di un buco nero supermassiccio di $3 \cdot 10^6 M_{\odot}$ lì residente. I risultati di uno studio supportano uno scenario nel quale il bulge si è generato prima e più rapidamente del disco e la sua formazione è analoga a quella di una galassia ellittica.

2.4 Alone

Il disco galattico appare circondato da un alone molto esteso composto da stelle e materia oscura, la quale copre il 90% della massa totale di questo. Le stelle costituiscono $10^9 M_{\odot}$, sono generalmente vecchie, la maggior parte di età più avanzate di 12 Gyr, e sono poverissime di metalli: la distribuzione mostra un picco a 1/30 del valore solare. La stella con minore metallicità trovata nella Via Lattea è una stella dell'alone avente abbondanza di metalli minore di quella solare di un fattore 200.000. Il profilo di densità è molto ripido:

$$\rho(r) \sim \rho_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^n \text{ con } n \sim 3 \quad (2.2)$$

Il raggio contenente metà della luminosità è di soli 3,5 kpc. Le stelle qui presenti hanno un momento angolare basso, a differenza di quelle nel disco. L'alone di materia oscura sembra estendersi almeno fino a centinaia di parsec e possibilmente anche di più, raggiungendo dimensioni ben superiori a quelle della materia visibile.

⁴HIM, gas molto caldo a 10^7 K

Capitolo 3

Cinematica della Via Lattea

Le osservazioni del moto sia delle stelle che del gas interstellare hanno confermato la rotazione della Via Lattea intorno a un asse normale al piano galattico e mostrato che questa rotazione è differenziale: questo significa che la velocità angolare della rotazione dipende dalla distanza dall'asse, pertanto la Galassia non ruota come un disco rigido. È risaputo che il Sole si muova a 220 km/s intorno al centro, con un periodo di 240 Myr. Le stelle più vicine al centro impiegano meno tempo a completare un'orbita, quelle più lontane un tempo maggiore, come mostrato in figura 3.1. Gli effetti osservabili della rotazione galattica furono ricavati dall'astronomo olandese Jan Hendrik Oort.

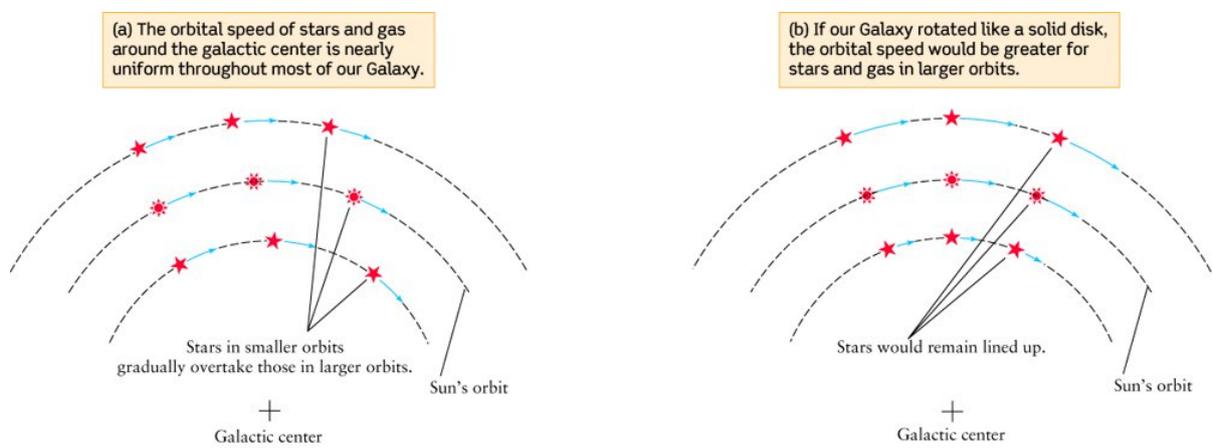


Figura 3.1: La rotazione della Galassia reale e come se fosse un corpo rigido. Crediti: University of Alberta.

3.1 Costanti di Oort

Si considerano i moti degli oggetti come orbite circolari, approssimazione accettabile per le stelle di Popolazione I e per il gas, e il disco rotondo e infinitamente sottile, che giace sul piano $z = 0$. L'origine O del sistema di riferimento è nel centro galattico: la velocità angolare non sarà costante, bensì una funzione della distanza da O¹. Si prende in esame una stella in un punto \vec{x} , che viaggia con una velocità circolare \vec{V} a distanza R da O, e il Sole in \vec{x}_\odot , con velocità \vec{V}_\odot a distanza R_\odot dal centro. Si definisce il vettore distanza tra il Sole e la stella $\vec{l} = \vec{x} - \vec{x}_\odot$ e λ l'angolo compreso tra la direzione di \vec{x}_\odot e quella di \vec{l} . Quello che si può trovare è la velocità relativa tra i due corpi $\vec{v} = \vec{V} - \vec{V}_\odot$. Tuttavia, non conoscendo le velocità tangenziali, non si può sapere qual è la direzione di \vec{v} . Pertanto la velocità relativa viene scomposta nelle componenti parallela e perpendicolare. I risultati che si ricavano sono i seguenti:

$$v_{\parallel} = R_\odot \Delta\omega \sin\lambda \quad (3.1)$$

$$v_{\perp} = \omega l + R_\odot \Delta\omega \cos\lambda \quad (3.2)$$

Ora ci si posiziona in campo vicino, ovvero nelle vicinanze del Sole, in modo tale da avere $l \ll R_\odot$. Qui si può costruire $\omega(R)$, la quale risulta

$$\omega(R) = \omega(R_\odot) + \omega' l \cos\lambda \quad (3.3)$$

da cui

$$\Delta\omega = \omega' l \cos\lambda \quad (3.4)$$

Sostituendo la 3.4 nelle equazioni 3.1 e 3.2 e ricordando di trovarsi in campo vicino, si ottengono i seguenti risultati:

$$v_{\parallel} = \frac{1}{2} \omega' R_\odot l \sin 2\lambda = A \sin 2\lambda \quad (3.5)$$

$$v_{\perp} = \omega_\odot l + \omega' R_\odot l \left(\frac{1 + \cos 2\lambda}{2} \right) = B \cos 2\lambda + Bl \quad (3.6)$$

Dunque le costanti di Oort A e B sono così definite:

$$A \equiv \frac{\omega' R_\odot}{2} \quad (3.7)$$

$$B \equiv \omega_\odot + \frac{\omega' R_\odot}{2} = \omega_\odot + A \quad (3.8)$$

Quando si tratta di un moto circolare vale sempre la relazione $\omega = v_C/R$, quindi è importante sottolineare che

$$\begin{aligned} A + B &= v'_{C_\odot} \\ B - A &= \frac{v_{C_\odot}}{R_\odot} \end{aligned} \quad (3.9)$$

¹In ogni punto generico \vec{x} esiste un vettore $\vec{\omega}$ avente direzione parallela all'asse z, tale per cui $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{x}$.

Al 2018, i valori più accurati per queste costanti sono $A = 15,3 \pm 0,4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ e $B = -11.9 \pm 0.4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$.

3.2 Curve di rotazione

Si prenda in esame un oggetto isolato nel vuoto che crea un campo. Esiste una curva di rotazione, che è una proprietà intrinseca di questo campo, che descrive come varia la velocità di rotazione di un punto in funzione della distanza. È uno strumento utile anche per mostrare come è distribuita la massa di un sistema rotante, eguagliando l'accelerazione di gravità con quella centrifuga:

$$\frac{v_C^2(r)}{r} = \frac{GM(r)}{r^2} \Rightarrow M(r) = \frac{v_C^2(r)r}{G} \quad (3.10)$$

La massa qui indicata è intesa come massa totale all'interno del raggio r .

3.2.1 Curva rigida

Si nota una curva di rotazione rigida quando il sistema mostra una velocità angolare costante in tutti i punti: in questo caso la velocità di rotazione è maggiore a grandi distanze. Questo implica l'isocronismo del sistema, ovvero tutti i punti che ruotano impiegano lo stesso tempo per compiere un giro completo. Per una distribuzione a simmetria sferica e a densità costante $\rho = \rho(t)$, la velocità dipende linearmente dal raggio:

$$v_C^2(r) = \frac{GM(r)}{r} = \frac{G}{r} \int_0^r \rho(t) 4\pi t^2 dt = \frac{4\pi G \rho}{3r} r^3 \Rightarrow v_C(r) \propto r \quad (3.11)$$

3.2.2 Curva Kepleriana

La curva di rotazione del Sistema Solare, raffigurata in figura 3.2, è un esempio di curva Kepleriana. Il Sole è visto come un punto di massa M_\odot , perciò un pianeta a distanza R avrà una velocità circolare ottenuta sostituendo la massa del Sole nell'equazione 3.10:

$$\frac{GM_\odot}{R^2} = \frac{v_C^2(R)}{R} \Rightarrow v_C(R) \propto R^{-\frac{1}{2}} \quad (3.12)$$

Questo significa che i pianeti più vicini al Sole hanno velocità maggiori di quelli lontani, quindi hanno periodi di rivoluzione più corti. A titolo di esempio, si può confrontare il periodo orbitale di Mercurio con quello di Nettuno. Il primo si trova mediamente a $5,5 \cdot 10^7 \text{ km}$ dal Sole e impiega all'incirca 88 giorni per completare una rivoluzione; il secondo, distante in media $4,5 \cdot 10^9 \text{ km}$, necessita approssimativamente 165 anni.

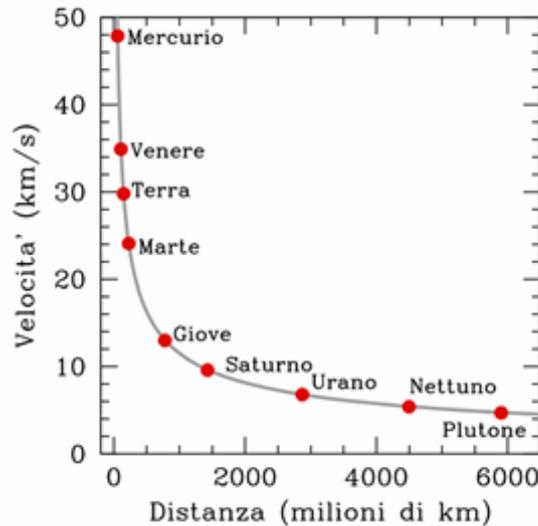


Figura 3.2: Curva di rotazione del Sistema Solare. Gli oggetti più distanti hanno velocità minori. Crediti: INAF - OA Brera.

3.2.3 Curva di una sfera omogenea

Si consideri una sfera omogenea di raggio a e densità ρ_0 . Per i teoremi di Newton un guscio sferico esercita su una particella esterna una forza gravitazionale pari a quella di una particella puntiforme di uguale massa posta nel centro di massa, mentre è nulla per una particella al suo interno. Entro il raggio della sfera, cioè nel caso in cui si prende $r < a$, la distribuzione di massa si può scrivere come

$$M(r) = 4\pi \int_0^r t^2 \rho(t) dt = 4\pi \rho_0 \frac{r^3}{3} \Rightarrow M(r) \propto r^3 \quad (3.13)$$

Sostituendo questo valore nell'equazione 3.10, si ricava esattamente la stessa curva descritta dall'equazione 3.11. Come era prevedibile, i punti che stanno all'interno di una sfera omogenea descrivono una curva di rotazione rigida. Quando ci si posiziona al di fuori della sfera, ovvero quando $r > a$, come nel caso mostrato nella sezione 3.2.2, la sfera è vista come un punto di uguale massa posto al centro di essa: dunque la curva al di fuori sarà di tipo Kepleriano, con la tipica caduta $v_C(r) \propto r^{-\frac{1}{2}}$

3.3 Curva di rotazione della Via Lattea

Nell'introduzione del capitolo si è già parlato della rotazione differenziale della Galassia: le parti esterne si muovono con velocità angolari minori. Esaminando la materia visibile, si prevede una curva divisa a tratti, mostrata in figura 3.3.

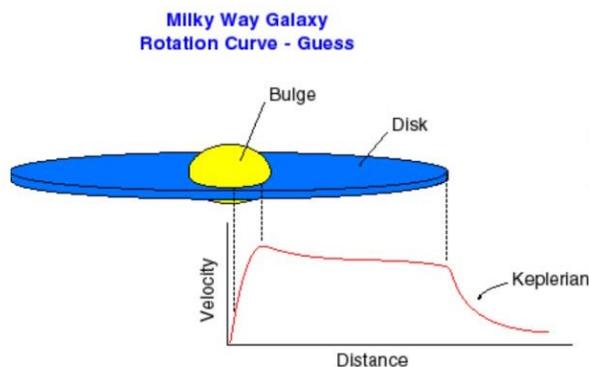


Figura 3.3: Curva di rotazione teorica della Via Lattea, con la caduta Kepleriana che in realtà non si osserva.

Bulge Si considera un modello sferico per la distribuzione della massa, a densità costante. Questo modello ricade esattamente nella descrizione dell'interno di una sfera omogenea, che a sua volta era un caso particolare della curva di rotazione rigida, governata dall'equazione 3.11.

Disco In un disco avente densità superficiale $\sigma(r)$, la massa può essere riscritta come

$$M(< r) = \int_0^r 2\pi r \sigma(r) dr \quad (3.14)$$

È dimostrabile che in questo caso la velocità non dipenda da r e quindi che la curva di rotazione di un disco sia essenzialmente piatta.

Esterno A grandi distanze dal centro galattico la massa della Galassia M_{gal} può essere considerata puntiforme: si ritorna in regime Kepleriano.

Quello che si osserva, invece, è che la curva di rotazione diventa piatta dopo un certo raggio, dunque $v_C(r > R_0) \sim cost$. La velocità costante implica $M(r) \sim r$, ovvero che la massa deve continuare a crescere anche oltre il raggio massimo R_0 a cui si osservano stelle. L'astronoma Vera Rubin ragionò in tal modo: si chiese come dovrebbe essere un

profilo di densità a simmetria sferica per produrre una curva di rotazione piatta. Prese quindi una distribuzione del tipo $\rho(r) = A/r^\alpha$ con α tale per cui la curva rimanga piatta. Se $\rho \sim r^{-\alpha}$ la massa cresce così:

$$M = 4\pi A \int_0^r t^{2-\alpha} dt = \frac{4\pi A}{3-\alpha} r^{3-\alpha} \quad (3.15)$$

La velocità circolare sarà

$$v_C^2(r) = \frac{G4\pi A}{3-\alpha} r^{2-\alpha} \quad (3.16)$$

pertanto serve avere $\alpha = 2$ per avere la curva di rotazione piatta. Come visto dalla sezione 2.1 la distribuzione di densità lungo il disco cade esponenzialmente, perciò serve altra materia oltre quella stellare: Vera Rubin ipotizzò allora la presenza di materia oscura². La discrepanza tra curva aspettata e curva osservata è ben descritta in figura 3.4, in cui si evidenzia la differenza di velocità per il Sole.

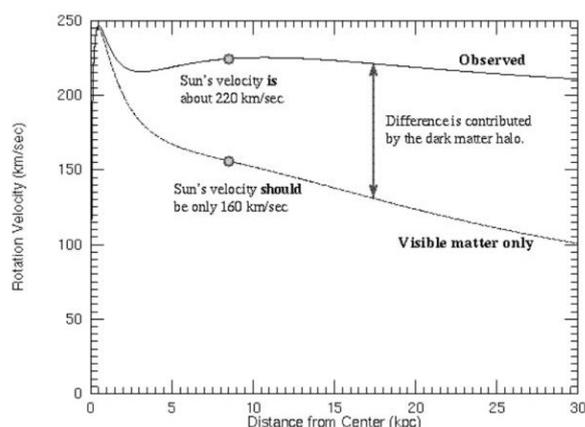


Figura 3.4: Differenze tra la curva reale di rotazione della Via Lattea e quella dovuta solo alla materia luminosa.

3.3.1 Determinazione della curva

La curva di rotazione è stata ottenuta usando le stelle e, in particolar modo, nubi di idrogeno neutro HI osservate in tutto il disco nel radio a 21 cm. Il vantaggio di osservare queste nubi è che a quelle frequenze non si risente degli effetti di estinzione della polvere.

²Non fu la prima a parlarne: nel 1933 l'astronomo svizzero Fritz Zwicky suggerì l'esistenza di massa non visibile per giustificare la forza gravitazionale delle galassie.

Riga di HI

In un atomo di idrogeno, lo stato fondamentale è diviso in due livelli a seconda che gli spin dell'elettrone e del protone siano paralleli (livello superiore) o antiparalleli (livello inferiore). La differenza energetica tra i due sottolivelli è pari a $5.9 \cdot 10^{-6}$ eV e corrisponde all'emissione di un fotone di frequenza $\nu = 1420$ MHz, cioè di lunghezza d'onda $\lambda = 21$ cm. La probabilità che avvenga questa transizione, espressa dal *coefficiente di Einstein A*, è estremamente bassa e si dice proibita. Dalla meccanica quantistica $A = 2,9 \cdot 10^{-15} \text{ s}^{-1}$, che corrisponde ad un tempo di vita media per il livello superiore pari a $t_{rad} = 10^7 \text{ yr}$. Risulta molto più probabile il decadimento collisionale: se si prende la densità dei partner collisionali (principalmente altri atomi di idrogeno) $N_H = 10 \text{ cm}^{-3}$, il tempo di collisione è 300 yr. Per poter osservare questa riga, servono dunque densità molto basse. Questo tipo di radiazione non è assorbita né scatterata dalla polvere interstellare; per questo motivo può essere usata per mappare la Via Lattea su larga scala.

Il *tangent point method*

Non si può conoscere a priori la posizione di una nube HI, ma esiste un metodo indiretto per calcolare la distanza dal centro galattico basato sulla rotazione differenziale. Si esamina la figura 3.5.

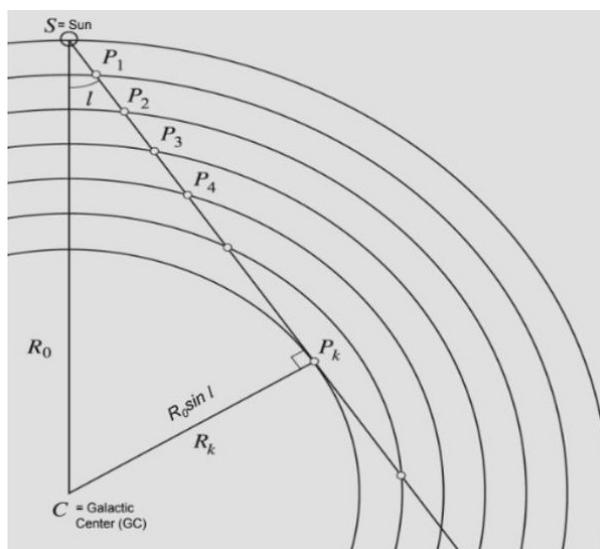


Figura 3.5: Il tangent point method. P_1, \dots, P_k sono nubi HI.

La nube che si trova nel punto P_k avrà la maggiore velocità angolare; qui la linea di vista è tangente alla circonferenza su cui giace. Si possono misurare le velocità radiali: lungo la linea di vista, queste crescono con la distanza fino a raggiungere la massima velocità

in P_k .

$$v_{r,max} = v(R_k) - v_{\odot} senl \quad (3.17)$$

dove $R_k = R_{\odot} senl$ è il raggio al quale è massima v_{rad} , come indicato in figura, e l è la longitudine galattica. Il metodo consiste nel trovare qual è la nube lungo la linea di vista, a una fissata longitudine, che presenta la velocità radiale maggiore: si stima la sua distanza dal centro galattico (perché si conoscono a priori i valori di R_{\odot} e l) e si ripete la procedura variando la longitudine.

$$v(R_k) = v_{r,max} + v_{\odot} senl \quad (3.18)$$

Sapendo che $senl = R/R_{\odot}$,

$$v(R) = v_{r,max} + \frac{R}{R_{\odot}} v_{\odot} \quad (3.19)$$

3.3.2 Winding dilemma

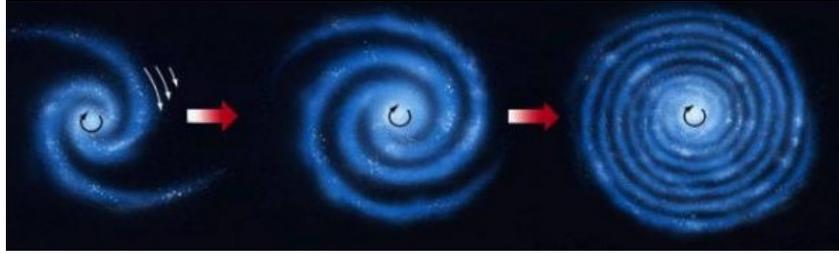


Figura 3.6: Winding dilemma: sarebbe sufficiente solo qualche rivoluzione affinché la Galassia assuma questa forma.

A causa della rotazione differenziale, gli oggetti più lontani del disco rimangono indietro rispetto a quelli più interni causando avvolgimenti sempre più stretti alla spirale, raffigurati in figura 3.6, fino alla totale scomparsa dei bracci in poche rivoluzioni. Il Sole ha un periodo di 240 Myr e un età di 5 Gyr, dovrebbe quindi aver già fatto 20 giri completi. Questò è noto come *winding problem*. La soluzione proposta per la formazione dei bracci è la *density wave theory*, sviluppata da Chia-Chiao Lin e Frank Shu negli anni '60. Le spirali sono considerate variazioni di densità del disco che ruotano più lentamente del gas e delle stelle, i quali durante la loro orbita entrano ed escono dai bracci. Questa teoria giustifica perché gli oggetti più giovani, come nubi molecolari e stelle luminose, si trovano nei bracci. Una nube con una certa velocità, passando attraverso l'onda, rallenta, ma la parte posteriore continua a viaggiare con la velocità iniziale finché non interagisce con l'onda: quindi la nube viene fortemente compressa, collassa e diventa sito di formazione stellare. La materia impiega 10 Myr a passare completamente attraverso un braccio: in questo intervallo di tempo le stelle calde hanno già ultimato la loro evoluzione, perciò vengono sempre individuate nei bracci.

Bibliografia

- [1] J. BINNEY AND S. TREMAINE, *Galactic dynamics*, Princeton series in astrophysics, Princeton University Press, Princeton, 2nd ed., 2008.
- [2] A. CIMATTI, *Astronomia*, Dispense del corso, (2016/2017).
- [3] L. CIOTTI, *Alcune questioni matematiche riguardanti la dinamica stellare*, La Matematica nella Società e nella Cultura, 5-A (2002), pp. 97–141.
- [4] L. CIOTTI, *Astrofisica extragalattica*, Appunti del corso, (2018/2019).
- [5] COSMOS. <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/>.
- [6] D. DALLACASA, *Processi di radiazione e MHD*, Dispense del corso, (2018/2019).
- [7] G. DE VAUCOULEURS, *Recherches sur les nébuleuses extragalactiques*, Annales d’Astrophysique, 11 (1948), p. 247.
- [8] E. P. HUBBLE, *Extragalactic nebulae*, The Astrophysical Journal, 64 (1926), p. 321.
- [9] H. KARTTUNEN, P. KRÖGER, H. OJA, M. POUTANEN, AND K. J. DONNER, eds., *Fundamental Astronomy*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [10] M. ZOCCALI, A. LECUREUR, B. BARBUY, V. HILL, A. RENZINI, D. MINNITI, Y. MOMANY, A. GÓMEZ, AND S. ORTOLANI, *Oxygen abundances in the Galactic bulge: evidence for fast chemical enrichment*, Astronomy & Astrophysics, 457 (2006), pp. L1–L4.