

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

---

SCUOLA DI SCIENZE  
Corso di Laurea in Astronomia  
Dipartimento di Fisica e Astronomia



*STRUTTURA E CINEMATICA DELLA VIA LATTEA*

Tesi di Laurea in Astronomia

Candidato:  
**Enrico Ravaioni**

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

---

---

Sessione I  
Anno Accademico 2013/2014

*Ai miei nonni Vinicio e Renato  
e alle mie nonne Rosaria e Vera*

# Abstract

La Via Lattea è la galassia che, tra le altre cose, ospita il sistema in cui viviamo: il Sistema Solare.

In questo elaborato, dopo una breve panoramica sui vari tipi di galassie, verranno descritte tutte le componenti che ne determinano la morfologia e verranno riportati alcuni di quei fenomeni fisici che ne determinano la cinematica.

Si accennerà, inoltre, ad una missione spaziale che, nei prossimi anni, fornirà informazioni che saranno di fondamentale importanza ai fini di ampliare le conoscenze sulla nostra galassia “madre”.

# Indice

<b>1</b>	<b>Classificazione delle galassie</b>	<b>1</b>
1.1	Galassie ellittiche	1
1.2	Galassie a spirale	2
1.3	Galassie irregolari	3
<b>2</b>	<b>Struttura della Via Lattea</b>	<b>4</b>
2.1	Centro galattico	4
2.2	Disco galattico	5
2.2.1	Teoria dell'onda di densità ( <i>Density Wave Theory</i> )	6
2.3	Alone galattico	7
<b>3</b>	<b>Cinematica della Via Lattea</b>	<b>8</b>
3.1	Curva di rotazione differenziale	8
3.2	Determinazione della curva di rotazione	11
3.2.1	Caratteristiche della riga a 21 cm	12
<b>4</b>	<b>La missione spaziale <i>GAIA</i></b>	<b>14</b>
4.1	Principali obiettivi della missione spaziale	15
	<b>Bibliografia</b>	<b>16</b>
	<b>Sitografia</b>	<b>16</b>



# Capitolo 1

## Classificazione delle galassie

La classificazione delle galassie si deve all'astrofisico statunitense Edwin Hubble (1889-1953) il quale, nei primi decenni del XX secolo, studiò le stelle variabili della nebulosa di Andromeda<sup>1</sup> e notò una incredibile somiglianza con le *variabili Cefeidi*<sup>2</sup> che sono all'interno della nostra galassia. Considerandole simili, riuscì a calcolarne la distanza e a dedurre che la nebulosa di Andromeda era in realtà una galassia a sé stante. In un libro del 1936 Hubble pubblicò il suo schema di classificazione delle galassie il quale, seppur con qualche modifica, è ritenuto valido ancora oggi.

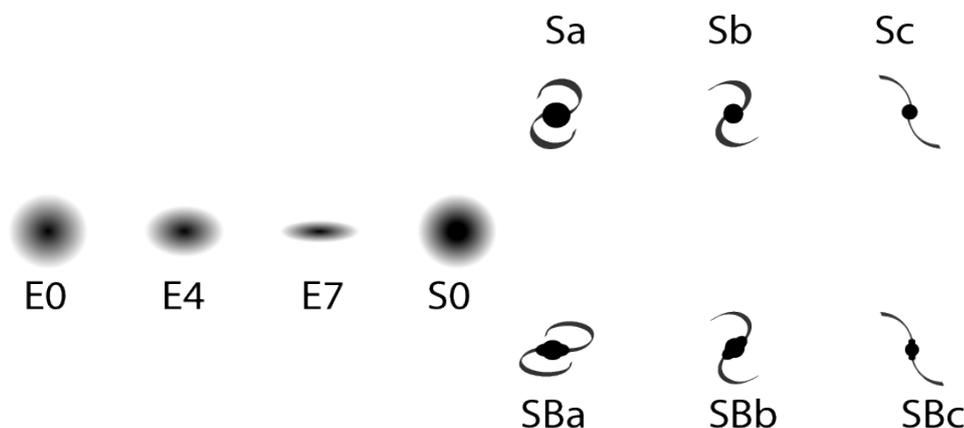


Figura 1.1: Schema di Hubble della classificazione delle galassie.

### 1.1 Galassie Ellittiche

Le galassie ellittiche sono classificate in base alla forma, che può variare da rotonda a molto allungata. Ad ognuna è assegnata una tipologia  $En$  dove l'indice  $n$  è calcolato, in base al rapporto assiale apparente ( $b/a$ ), attraverso la formula  $n = 10[1 - (b/a)]$ . Quindi, una galassia che nel cielo appare rotonda ha  $b = a$  e dunque è denominata E0. Le galassie ellittiche più comuni sono dette *ellittiche nane*, viste le loro piccole dimensioni che sono tipicamente dell'ordine del kpc (dove  $1 pc = 3,08 \cdot 10^{18} cm$ ). Le masse sono dell'ordine di qualche milione di masse solari ( $\propto 10^6 M_{\odot}$ )<sup>3</sup>.

Più spettacolari sono invece le cosiddette *ellittiche giganti* le cui dimensioni possono arrivare anche a centinaia di kpc e masse di circa  $10^{12} M_{\odot}$ .

Le galassie ellittiche sono generalmente povere di gas freddo e di conseguenza contengono una popolazione stellare evoluta quasi completamente priva di stelle di classi O oppure B. Degli studi mostrano che la luminosità di molte galassie ellittiche può essere descritta in modo piuttosto accurato da una legge nota come *legge di De Vaucouleur* :

<sup>1</sup> Prima degli studi di Hubble le galassie erano classificate come *nebulose* ed erano considerate come facenti parte della nostra stessa galassia.

<sup>2</sup> Sono una particolare classe di stelle variabili utilizzate per calcolare con grande precisione le distanze degli ammassi globulari o delle galassie che le ospitano. Questo grazie alla loro relazione tra luminosità assoluta e tempo di variabilità. Infatti, al contrario delle stelle comuni, per le Cefeidi è possibile conoscere a priori la luminosità assoluta. Ad esempio, una Cefeide con un periodo di tre giorni ha  $L = 8 \cdot 10^2 L_{\odot}$ .

Devono il loro nome a  $\delta Cephei$ , la prima stella di questo tipo scoperta nella Costellazione di Cefeo.

<sup>3</sup>  $M_{\odot}$  indica la massa del Sole e vale:  $M_{\odot} = (1.98855 \pm 0.00025) \cdot 10^{33} g$ .

$$L(r) \propto e^{-(r/r_0)^{1/4}}$$

Dove  $r_0$  è una costante la cui determinazione è però affetta da circa il 40% di dispersione.



**Figura 1.2:** Due esempi di galassie ellittiche. La prima è la galassia *NGC 3377* che si trova nella costellazione del Leone ed è di tipo E6, mentre la seconda è la galassia *NGC 4552* che si trova nella costellazione della Vergine ed è di tipo E0.<sup>4</sup>

## 1.2 Galassie a spirale

Le galassie a spirale sono così chiamate a causa dei loro brillanti bracci spiraleggianti. Sono suddivise in tre classi: *Sa*, *Sb* e *Sc*. La loro classificazione viene fatta 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 (detto *bulge*)
3. Il disco della galassia

Le galassie di tipo *Sa* hanno il rigonfiamento centrale più grande e le braccia più "attorcigliate", mentre le galassie di tipo *Sc* hanno il rigonfiamento centrale più piccolo e le braccia a spirale più aperte. Le *Sb* sono, ovviamente, ad uno stadio intermedio<sup>5</sup>.

Alcune spirali hanno una barra luminosa che attraversa il centro fino al punto in cui le braccia sembrano incominciare. Questo tipo di galassie sono chiamate *spirali barrate* e anche loro hanno delle sottoclassi denominate *SBa*, *SBb* e *SBc* in base agli stessi criteri utilizzati per le spirali semplici.

Lo studio della luce proveniente dalle galassie a spirale ci suggerisce che, al loro interno, la formazione stellare è ancora in corso. Siamo in grado di avere una buona idea di come queste giovani stelle siano distribuite mano a mano che ci allontaniamo nel disco della galassia. La luminosità di quest'ultimo diminuisce bruscamente con  $r$ , che è la distanza dal centro galattico. Questo decadimento possiamo descriverlo con un'espressione esponenziale: se  $L(0)$  è la luminosità al centro della galassia, allora la luminosità  $L(r)$  ad un certo raggio  $r$  vale:

$$L(r) = L(0)e^{-(r/D)}$$

<sup>4</sup> La sigla *NGC* sta per *New General Catalogue*. Questo è la più famosa e completa raccolta di oggetti celesti di vario genere. Ne conta più di 8000.

<sup>5</sup> Si ritiene che la Via Lattea sia una via di mezzo tra quelle di tipo *Sb* e quelle di tipo *Sc*.

dove  $D$  è detto *lunghezza di scala della luminosità* e fornisce una misura del raggio caratteristico della galassia così come la si vede nella parte visibile dello spettro.



**Figura 1.3:** Due esempi di galassie a spirale. La prima è la galassia *NGC 5457* (nota anche con il nome di *Galassia Girandola*) che si trova nella Costellazione dell'Orsa Maggiore ed è di tipo Sc. La seconda è la spirale barrata *NGC 1365* che si trova nella Costellazione della Fornace ed è di tipo SBc.

### 1.3 Galassie irregolari

Hubble definì *irregolari* tutte quelle galassie che non rientravano nelle altre categorie. Distinse due tipi di galassie irregolari:

1. *Irr I* che possiedono alcune strutture, come stelle o nebulose, ma non abbastanza per poterle inserire in una delle precedenti categorie trattate.
2. *Irr II* che hanno un aspetto amorfo molto generico.

Oggi utilizziamo questo nome per tutte quelle galassie che non presentano né la caratteristica struttura a spirale né qualsiasi altro tipo di struttura organizzata.



**Figura 1.4:** La Piccola Nube di Magellano orbita attorno alla Via Lattea ed è un esempio di galassia irregolare.

# Capitolo 2

## Struttura della Via Lattea

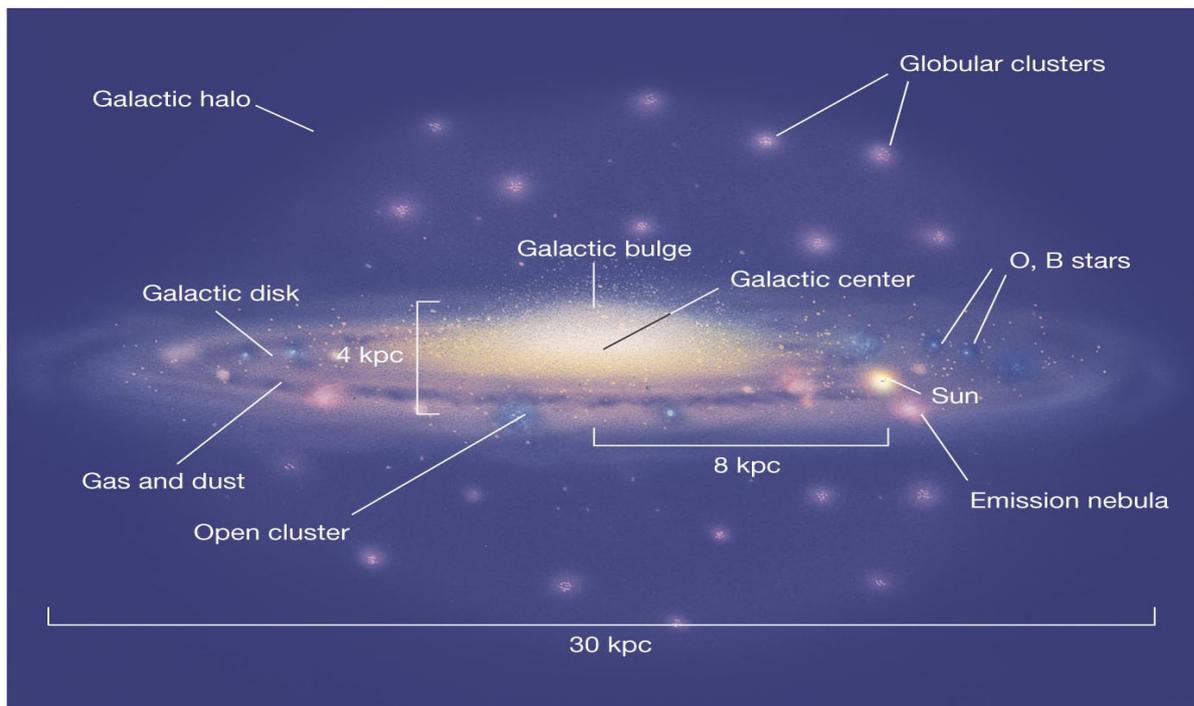


Figura 2.1: Rappresentazione grafica delle varie componenti della Via Lattea.

### 2.1 Centro galattico

Il centro galattico può essere diviso in due regioni principali:

- Il rigonfiamento centrale (o *bulge*)
- Il nucleo galattico vero e proprio

Quando parliamo di rigonfiamento centrale parliamo di una regione di spazio che si estende per un raggio di qualche kpc. Il modo migliore per osservare questa zona della Galassia è attraverso la luce infrarossa che, a differenza della luce visibile, viaggia indisturbata attraverso le nubi di polvere del disco. Da queste osservazioni si vede chiaramente che il centro è un rigonfiamento appiattito che, da solo, fornisce il 20% della luminosità totale della Galassia.

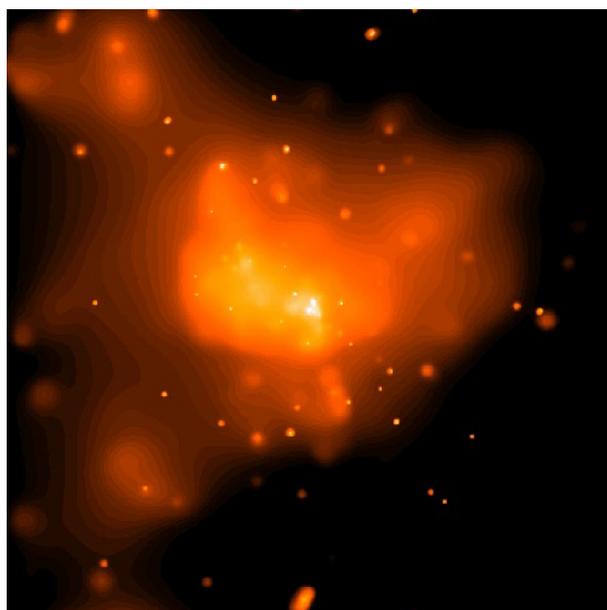
Le stelle del *bulge* hanno un'età di qualche miliardo di anni e non sono *metal-poor*, nonostante questa zona sia considerata come la parte iniziale dell'alone galattico che invece è ricco di stelle "povere di metalli". Ci sono stelle, infatti, che hanno un'abbondanza di metalli pesanti tre volte superiore a quella del Sole. Queste stelle si muovono nella stessa direzione del disco ed hanno dei moti casuali molto larghi. Nelle zone molto vicine al centro galattico troviamo del gas molto denso e delle stelle di recente formazione: a circa 150 pc dal centro si trova un ammasso stellare molto grande e denso, *Sagittario B2*, che sta generando stelle ad un ritmo molto elevato.

La luminosità del bulge vale circa  $5 \cdot 10^9 L_{\odot}$ <sup>6</sup> mentre la massa è circa  $2 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ . Come nucleo galattico, invece, si considera quella regione di spazio compresa entro un raggio di qualche centinaio di parsec.

<sup>6</sup>  $L_{\odot}$  indica la luminosità del Sole e vale:  $L_{\odot} = 3.839 \cdot 10^{33} \text{ erg/s}$ .

Lo studio del gas ionizzato attorno all'oggetto compatto che si trova al suo centro mostra una emissione a forma di arco perpendicolare al piano della Galassia. Tale emissione ha un'estensione di circa 15 minuti d'arco ed ha una struttura filamentosa. Questi filamenti sono altamente polarizzati e ciò significa che abbiamo a che fare con una emissione di sincrotrone dove gli elettroni che irradiano sono probabilmente confinati all'interno dei filamenti da dei campi magnetici piuttosto elevati. La presenza di questa forte emissione nella banda X indica temperature dell'ordine di  $10^8 K$  e tutto fa pensare che l'oggetto in questione sia un *buco nero*.

Capire se effettivamente nel cuore della nostra Galassia ci sia o meno un buco nero è un problema non banale. Un interessante approccio al problema è stato fatto nella seconda metà degli anni '90 da un gruppo di scienziati di UCLA (University of California, Los Angeles). La loro idea di base fu quella di misurare i moti propri delle stelle attorno a *Sagittarius A\**, una sorgente radio situata al centro della Galassia che ritenevano coincidesse con il buco nero. Gli scienziati identificarono circa 90 stelle con dei moti propri sufficientemente larghi da poter essere misurati. Le loro posizioni e velocità erano consistenti con il moto Kepleriano e ciò stava essenzialmente a significare che tutta la massa era più vicina al centro di qualsiasi delle stelle misurate. La stima migliore della massa in questione è  $(2.6 \pm 0.2) \times 10^6 M_{\odot}$ .



**Figura 2.2:** Emissione nella banda X del gas caldo presente nella regione centrale della Galassia.

## 2.2 Disco galattico

Il disco della Via Lattea ha davvero una forma spiraleggiante? Purtroppo, visto che il nostro punto di osservazione è interno alla Galassia, è difficile avere un'idea del modello globale. Possiamo comunque notare alcune similitudini tra la nostra Galassia e le altre spirali.

Sembra che le regioni HII<sup>7</sup> formino dei bracci a spirale nelle altre galassie. Per questo motivo si è cercato di vedere se suddette regioni, presenti anche nella nostra Galassia, formino dei modelli simili. Si è così scoperto che le loro posizioni non sono casuali e che formano delle catene che sono state identificate come i bracci della spirale e ognuna di queste è associata alla costellazione nella quale risulta più prominente.

---

<sup>7</sup> Quando una stella massiccia si forma emette fotoni visibili e ultravioletti. Fotoni con  $\lambda < 92.2 nm$ , nell'ultravioletto, hanno energia sufficiente ( $> 13.6 eV$ ) a ionizzare l'idrogeno. Il risultato finale di questo processo di ionizzazione è chiamato *regione HII*. L'equilibrio tra il processo di ionizzazione e quello di ricombinazione tra protoni ed elettroni per riformare atomi di H neutro determina la grandezza della regione HII.

Lo stesso risultato è stato ottenuto studiando le emissioni delle nubi molecolari e permettono dunque di osservare regioni della galassia altrimenti impossibili da osservare attraverso la luce visibile.

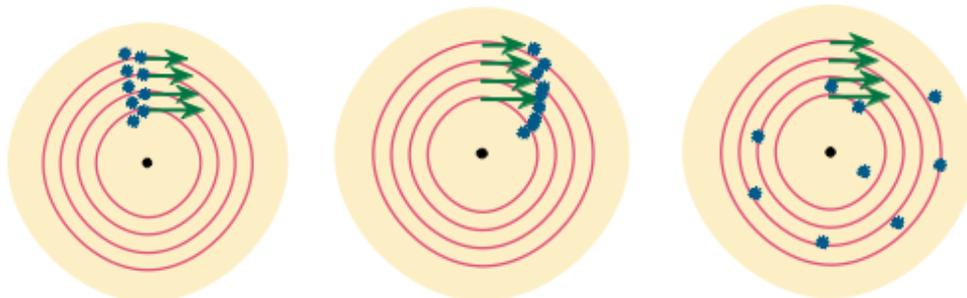
Il disco si può dividere in due parti: la parte più interna e sottile detta *thin disk* è circondata da una parte più spessa detta *thick disk*. La parte sottile contiene il 95% delle stelle dell'intero disco e tutte quante sono di recente formazione. La sua *altezza di scala*<sup>8</sup> varia dai 300 ai 400 pc. La parte più spessa del disco ha invece una altezza di scala di circa 1 kpc. Qui è raccolto il restante 5% delle stelle del disco le quali sono più vecchie e povere di elementi pesanti. Tutte queste stelle disegnano un'orbita quasi perfettamente circolare ed hanno una velocità di rotazione attorno al centro galattico di circa 200 km/s.

Il gas e la polvere del disco giacciono su uno strato molto sottile, spesso appena un centinaio di parsec. Lo spessore dello strato di gas aumenta approssimativamente in proporzione alla distanza dal centro galattico.

Complessivamente la luminosità del disco è circa  $1.5 \cdot 10^{10} L_{\odot}$  mentre la sua massa è dell'ordine di  $10^{10} M_{\odot}$ .

## 2.2.1 Teoria dell'onda di densità (*Density Wave Theory*)

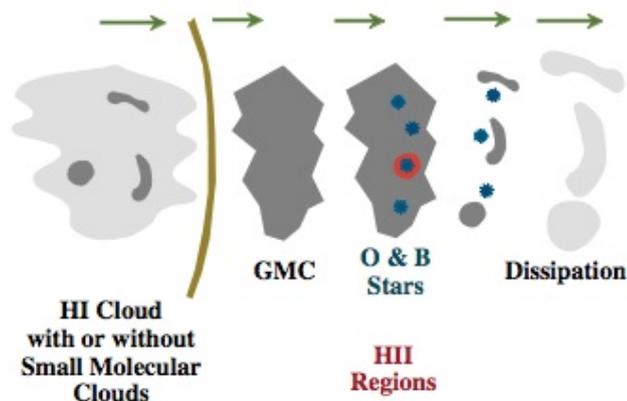
I bracci a spirale presenti nel disco possono essere temporanei oppure possono durare nel tempo. Un possibile scenario per la formazione dei bracci temporanei è illustrato in Figura 2.3: per un motivo o per un altro le stelle si formano in una regione della galassia. Questa viene in qualche modo “distesa” dagli effetti della rotazione differenziale fino a farla diventare un braccio di spirale. In questa situazione ogni braccio sopravvive per un breve periodo e ne vengono continuamente creati di nuovi.



**Figura 2.3:** Formazione ed evoluzione delle strutture a spirale temporanee [Kutner 2003].

Se il modello a spirale persiste per un lungo periodo allora vuol dire che i bracci e la materia si muovono a velocità differenti. La *teoria dell'onda di densità* cerca di spiegare questo fenomeno. Una grande nube di HI (o un gruppo di piccole nubi) si avvicina ad un braccio ad una velocità, relativa ad esso, di 100 km/s. Quando la nube entra nel braccio viene rallentata ma la sua parte posteriore non rallenta fino a quando non raggiunge la parte anteriore nel fronte di contatto del braccio. Questo provoca una compressione della nube e dunque l'inizio della formazione stellare. Le stelle brillanti non vivono molto a lungo quindi le vediamo solo in zone circoscritte e formano quelle catene luminose che denotano i fronti dei bracci (ovvero i luoghi dove avviene la compressione delle nubi). Inoltre, la radiazione proveniente da queste stelle massicce appena formate disgrega ciò che rimane delle nubi. Questo fenomeno è schematizzato nella figura seguente:

<sup>8</sup> Si definisce *altezza di scala* la distanza che si deve percorrere perpendicolarmente al disco per vedere la densità diminuire di un fattore di  $1/e$ , dove  $e$  è il numero di Nepero ed è così definito:  $e := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!}$ .



**Figura 2.4:** 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 di tutti i tipi di stelle e la radiazione proveniente da stelle di tipo *O* e di tipo *B* provoca la disgregazione delle nubi molecolari rimaste [Kutner 2003].

## 2.3 Alone galattico

L'alone galattico è una distribuzione sferica di stelle che circonda l'intera galassia. A differenza del disco è privo di polvere e le stelle che ne fanno parte sono principalmente di *Popolazione II*<sup>9</sup>. La maggior parte di queste sono raggruppate in *Ammassi Globulari*. Questi hanno una geometria sferica con un raggio che varia dai 20 ai 100 parsec e ognuno contiene da alcune migliaia a centinaia di migliaia di stelle. La Via Lattea conta circa 150 ammassi globulari. La loro massa totale è circa  $10^9 M_{\odot}$ .

Dallo studio delle velocità orbitali del gas e delle stelle a grande distanza dal centro galattico si scopre che la massa della Galassia deve essere molto maggiore di quella che conosciamo attualmente. Si è giunti alla conclusione che oltre alla porzione visibile di alone, esista una ulteriore porzione esterna molto più grande e massiccia conosciuta come Alone Oscuro (*Dark Halo*) che contiene grandi quantità di materia oscura<sup>10</sup> (*Dark Matter*).



**Figura 2.5:** Ammasso Globulare *NGC 5272* visibile nella Costellazione dei Cani da Caccia. E' tra i più brillanti della Via Lattea.

<sup>9</sup> Stelle molto antiche che contengono una bassa percentuale di metalli pesanti contrariamente a quelle di *Popolazione I* che sono stelle giovani e ricche di elementi pesanti. Queste ultime si trovano sui dischi delle galassie a spirale.

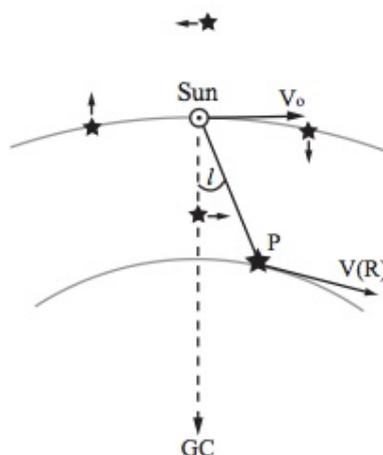
<sup>10</sup> In passato si è pensato che la materia oscura potesse essere composta da *neutrini* nel caso in cui questi avessero avuto massa a riposo. Questa è stata stimata intorno ai  $10^{-2} eV$  ma nonostante ciò l'idea di far coincidere materia oscura e neutrini oggi non è più accettata rendendo questo campo di ricerca uno dei più attuali e misteriosi dell'astrofisica moderna.

# Capitolo 3

## Cinematica della Via Lattea

Con una buona approssimazione, le stelle e il gas presenti sul disco della Via Lattea si muovono su orbite circolari. Guardando verso l'interno, vediamo le stelle che, muovendosi ognuna sulla propria orbita, ci sorpassano poiché il loro moto relativo al sistema solare è nella stessa direzione della velocità orbitale  $V_0$  del Sole. Guardando verso l'esterno, invece, vediamo le stelle che compiono un moto retrogrado che va dunque nella direzione opposta rispetto al sistema Solare. Le stelle alla stessa distanza del Sole dal centro galattico ruotano alla sua stessa velocità dunque mantengono una distanza fissa e hanno un movimento laterale (Figura 3.1).

Le stelle più vicine al centro della Galassia completano le loro orbite in meno tempo rispetto a quelle più lontane. Quando il periodo orbitale dipende dalla distanza dal centro del sistema allora diciamo che il materiale in questione (che siano stelle o gas) presenta una *rotazione differenziale*.



**Figura 3.1:** Rappresentazione della direzione del moto delle stelle rispetto al Sole [Sparke & Gallagher 2007].

### 3.1 Curva di rotazione differenziale

La rotazione differenziale galattica produce un effetto Doppler (*Doppler shift*) sulle righe spettrali che si osservano dalle nubi di gas a diversa distanza rispetto al Sole dal centro della Galassia. Questo fenomeno è rappresentato nelle Figure 3.2(a) e 3.2(b) dove: il punto 1 è leggermente più vicino al centro rispetto al Sole e quindi si muove un po' più velocemente generando così un piccolo effetto Doppler. Dal momento in cui si sta allontanando da noi vedremo uno spostamento delle righe verso lunghezze d'onda maggiori e dunque verso la parte rossa dello spettro elettromagnetico (*redshift*). La velocità del punto 2 è la stessa del punto 1 dato che appartengono alla stessa orbita e dunque anche l'effetto Doppler è sostanzialmente uguale. Il punto 3 è il punto che si muove più rapidamente attorno al centro e inoltre si sta direttamente allontanando da noi. Questo provoca un grande spostamento verso il rosso. Il punto 4 è sulla stessa orbita del sole quindi l'effetto Doppler è nullo. Infine, il punto 5 è più lontano dal centro rispetto al Sole e dunque si muove più lentamente. Questo provoca uno spostamento verso le lunghezze d'onda più corte cioè verso la parte blu dello spettro elettromagnetico (*blueshift*).

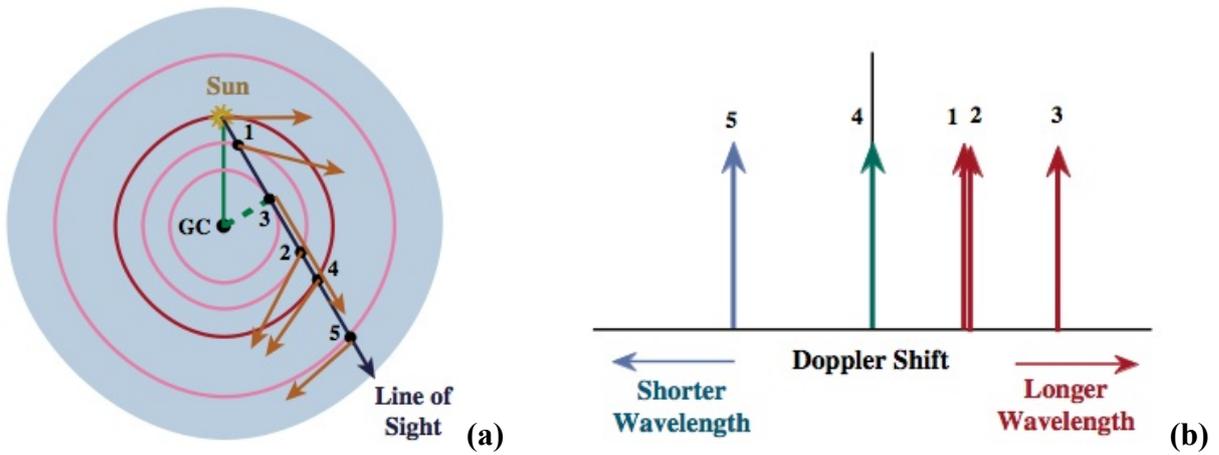


Figura 3.2: Effetto Doppler di oggetti a diversa distanza dal centro galattico [Kutner 2003].

Ora possiamo vedere come si calcola la velocità radiale  $V_r$  di una stella o di una nube di gas ad una distanza  $R$  dal centro galattico assumendo che segua un'orbita circolare con una velocità  $V(R)$ . Questa situazione è rappresentata in Figura 3.3 per  $R < R_0$ , ma il risultato è valido anche per  $R > R_0$ .

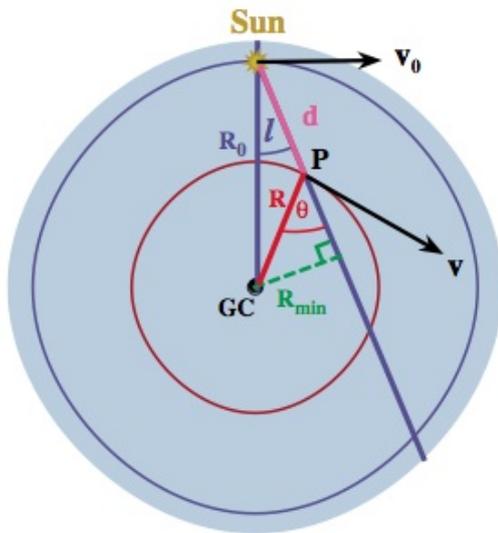


Figura 3.3: Rotazione differenziale e velocità radiali. Il Sole è ad una distanza  $R_0$  dal centro della Galassia. Osserviamo un oggetto nel punto P a distanza  $d$  dal Sole, lungo la linea di vista che forma un angolo  $l$ , detto *longitudine galattica*, con la linea che congiunge il Sole al centro del sistema GC [Kutner 2003].

La velocità radiale relativa è data da

$$V_r = V(R) \cos(90^\circ - \theta) - V_0 \cos(90^\circ - l)$$

Utilizzando la formula di sottrazione  $\cos(\alpha - \beta) = \sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha \cos \beta$  si ottiene

$$V_r = V(R) \sin \theta - V_0 \sin l \quad (3.2)$$

Ma le velocità si possono scrivere in funzione delle velocità angolari  $\Omega$  grazie alla relazione  $V(R) = \Omega \cdot R$  e quindi l'equazione (3.2) diventa

$$V_r = R\Omega(R) \sin \theta - R_0\Omega_0 \sin l \quad (3.3)$$

Utilizzando la legge del seno possiamo scrivere

$$\sin(180^\circ - \theta)/R_0 = \sin l/R \quad (3.4)$$

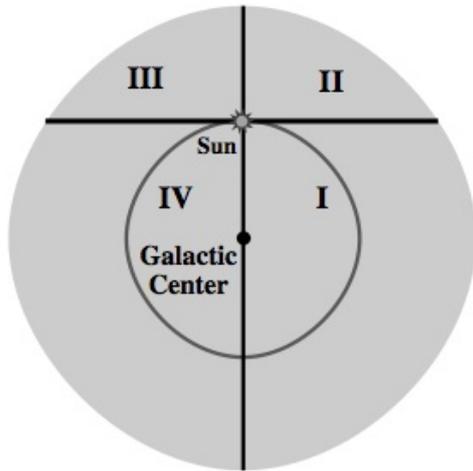
Ricordando la formula di sottrazione  $\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cos \beta - \sin \beta \cos \alpha$  il membro sinistro della (3.4) diventa

$$\sin \theta / R_0 = \sin l / R \quad (3.5)$$

Questa la si sostituisce prima nell'equazione (3.3) e poi si raccoglie  $R_0 \sin l$  ottenendo così

$$V_r = [\Omega(R) - \Omega_0] R_0 \sin l \quad (3.6)$$

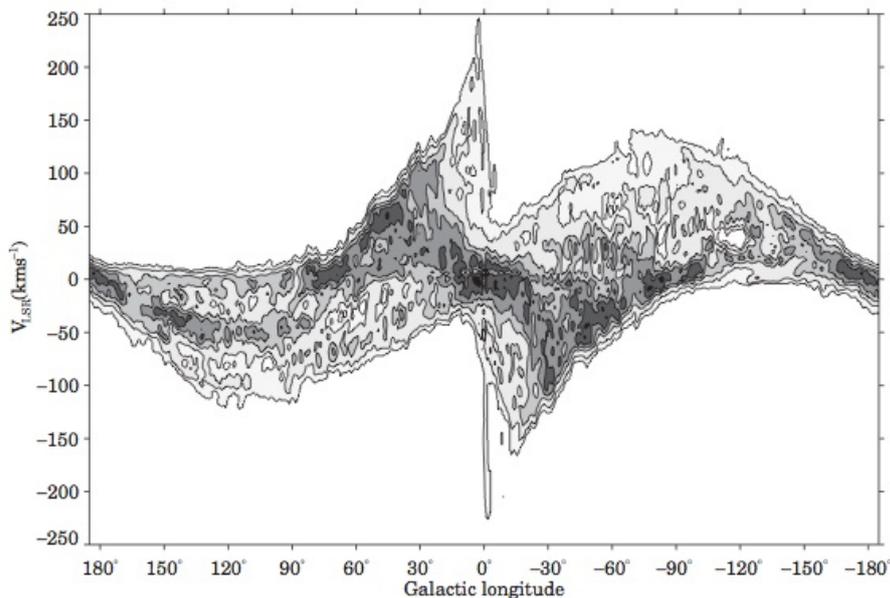
Per capire il comportamento di  $V_r$  è utile dividere la galassia in quadranti basati sul valore di  $l$  come illustrato nella figura seguente:



**Figura 3.4:** Rappresentazione della Galassia divisa nei quattro quadranti [Kutner 2003].

L'equazione (3.6) ci dice che nel primo quadrante, dove  $0 < l < 90^\circ$ ,  $[\Omega(R) - \Omega_0]$  aumenta per gli oggetti vicini al centro galattico e dunque aumenta  $V_r$ , che è sempre positiva. Per  $90^\circ < l < 180^\circ$  (II quadrante)  $V_r$  è sempre negativa poiché gli oggetti si trovano dietro all'orbita del Sole e hanno una distanza tale che  $R > R_0$  e dunque  $\Omega(R) < \Omega_0$ . Invece, per  $180^\circ < l < 270^\circ$  (III quadrante) la velocità radiale è sempre positiva. Il modello del I quadrante si ripete anche per il IV quadrante ( $270^\circ < l < 360^\circ$ ) con la sola differenza che il segno di  $V_r$  è invertito.

Il grafico che risulta da questo studio è riportato nella Figura 3.5.



**Figura 3.5:** Grafico della curva di rotazione della Via Lattea ottenuto con l'intensità dell'emissione della riga a 21 cm dell'idrogeno neutro presente sul disco della Galassia. Come ci si aspetta, non c'è gas con velocità positiva nel II quadrante e non c'è gas con velocità negativa nel III quadrante [Sparke & Gallagher 2007].

Quando l'oggetto P è ad una distanza tale che  $d \ll R$  possiamo trascurare i termini del tipo  $d^2$  e usando la regola del coseno per il triangolo di vertici Sun-P-GC di Figura 3.3 possiamo scrivere  $R \approx R_0 - d \cos l$ . Con questa approssimazione la velocità radiale dell'equazione (3.6), ricordando che possiamo scrivere  $\Omega = V/R$ , diventa

$$V_r \approx R_0 \sin l \left( \frac{V}{R} \right)' (R - R_0) \approx d \sin(2l) \left[ -\frac{R}{2} \left( \frac{V}{R} \right)' \right]_{R_0} \equiv d A \sin(2l) \quad (3.7)$$

dove si usa l'apice per indicare la derivata fatta rispetto ad R.

La costante  $A$  è la *prima costante di Oort* e vale  $14.8 \pm 0.8 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ .

E' possibile trovare un'espressione anche per la velocità tangenziale. Questa è:

$$V_T = V(R) \sin(90^\circ - \theta) - V_0 \sin(90^\circ - l) \quad (3.8)$$

Risolvendo i vari termini si ottiene

$$V_T = R\Omega(R) \cos \theta - R_0\Omega_0 \cos l \quad (3.9)$$

Si noti che  $R_0 \cos l = d + R \cos \theta$  e quindi  $R \cos \theta = R_0 \cos l - d$  che sostituito in (3.9) ci da

$$V_T = \Omega(R)[R_0 \cos l - d] - R_0\Omega_0 \cos l \quad (3.10)$$

Da cui, raccogliendo il termine  $\cos l$ , si ha

$$V_T = [\Omega(R) - \Omega_0]R_0 \cos l - \Omega(R)d \quad (3.11)$$

Vicino al Sole possiamo approssimare  $R_0 - R \approx d \cos l$  per mostrare che  $V_T$  varia quasi linearmente con la distanza  $d$  e otteniamo così

$$V_T \approx d \cos(2l) \left[ -\frac{R}{2} \left( \frac{V}{R} \right)' \right]_{R_0} - \frac{d}{2} \left[ \frac{1}{R} (RV)' \right]_{R_0} \equiv d[A \cos(2l) + B] \quad (3.12)$$

La costante  $B$  è la *seconda costante di Oort* e vale  $-12.4 \pm 0.6 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ . Le costanti di Oort  $A$  e  $B$  misurano rispettivamente la deviazione dalla rotazione rigida e la vorticità locale.

## 3.2 Determinazione della curva di rotazione

La curva di rotazione per il materiale che si trova all'interno dell'orbita del Sole (quindi  $R < R_0$ ) può essere calcolata in modo ragionevolmente dettagliato attraverso le osservazioni della *riga a 21 cm* emessa dalle nubi di idrogeno neutro HI. Il mezzo interstellare, infatti, è completamente trasparente a questa radiazione ed è così possibile esplorare anche regioni della Via Lattea che sono troppo lontane per potervici effettuare degli studi ottici.

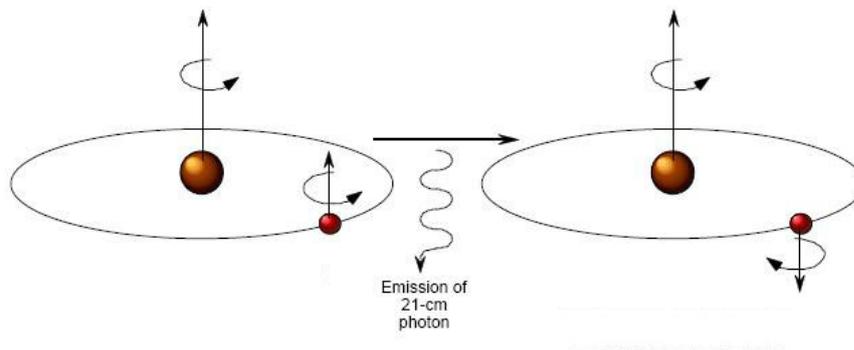
La quantità di HI non decresce rapidamente all'aumentare del raggio R. Ad esempio, la massa di HI all'interno di  $R_0$  è di circa  $10^9 M_\odot$  mentre la massa presente all'esterno è circa  $2 \cdot 10^9 M_\odot$  (ovviamente questa massa maggiore è distribuita in un volume più grande). Si noti che la massa dell'idrogeno neutro vale solo l'1% della massa totale interna ad un dato raggio R. Questo significa che il gas non è il principale responsabile della forza gravitazionale presente su larga scala nella galassia.

Prima di capire come è fatta la curva di rotazione della Galassia è bene spendere due parole sul fenomeno dell'emissione dell'idrogeno neutro nella banda radio ( $\lambda > 10 \text{ cm}$ ).

### 3.2.1 Caratteristiche della riga a 21 cm

Lo stato fondamentale dell'atomo di idrogeno consiste in due livelli che corrispondono alle configurazioni con spin dell'elettrone e del protone paralleli (livello superiore) e antiparalleli (livello inferiore). La differenza di energia fra i due livelli è  $\Delta E = 5.88 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$  che corrisponde all'emissione di un fotone di frequenza  $\nu = \Delta E/\hbar = 1420.40575 \text{ MHz}$ <sup>11</sup> ovvero di lunghezza d'onda  $\lambda = 21.1049 \text{ cm}$ .

La transizione fra i due livelli è fortemente proibita, infatti la probabilità di transizione spontanea fra il livello superiore e quello inferiore è espressa dal *coefficiente di Einstein*<sup>12</sup>  $A_H = 2.87 \cdot 10^{-15} \text{ s}^{-1}$  che corrisponde ad una vita media per il livello superiore  $\tau = 1/A_H = 1.1 \cdot 10^7$  anni. Le collisioni fra atomi accorciano il tempo di transizione al valore  $\tau_{coll} \approx 10^{10} \text{ s} \approx 3 \cdot 10^2$  anni che umanamente parlando è un tempo ancora grande, ma la probabilità diventa misurabile dal momento in cui sono presenti grandi masse di HI.



**Figura 3.6:** Rappresentazione dell'emissione della riga a 21 cm.

La brillantezza della riga è descritta da una temperatura di brillantezza,  $T_{BH}(\nu)$ , che è funzione della frequenza:

$$T_{BH}(\nu) = T_s [1 - e^{-\tau_H(\nu)}] \quad (3.13)$$

dove  $\tau_H(\nu)$  è lo spessore ottico dell'idrogeno che emette la riga alla frequenza  $\nu$ :

$$\tau_H(\nu) \approx 2.58 \cdot 10^{-15} \frac{n_H \phi(\nu) l}{T_s} \quad (3.14)$$

dove  $n_H$  è la densità di atomi di idrogeno neutro ed  $l$  è lo spessore lungo la linea di vista. La quantità  $n_H l = N_H$  è detta *densità di colonna* e rappresenta il numero di atomi di idrogeno contenuti in una colonna di sezione unitaria e altezza  $l$ . Integrando sul profilo della riga si ottiene  $N_H \approx 3.88 \cdot 10^{14} T_{BH}$ . In queste condizioni la temperatura di brillantezza dipende solo dalla densità di colonna. Quindi una misura della temperatura di brillantezza fornisce una stima del numero totale di atomi di idrogeno che emettono la radiazione in una certa direzione.

Utilizzando l'emissione della radiazione a 21 cm dell'idrogeno neutro, gli astronomi sono riusciti a derivare una ragionevole curva di rotazione per il materiale che sta tra i 3 e gli 8 kpc, quindi all'interno dell'orbita solare ( $R < R_0$ ).

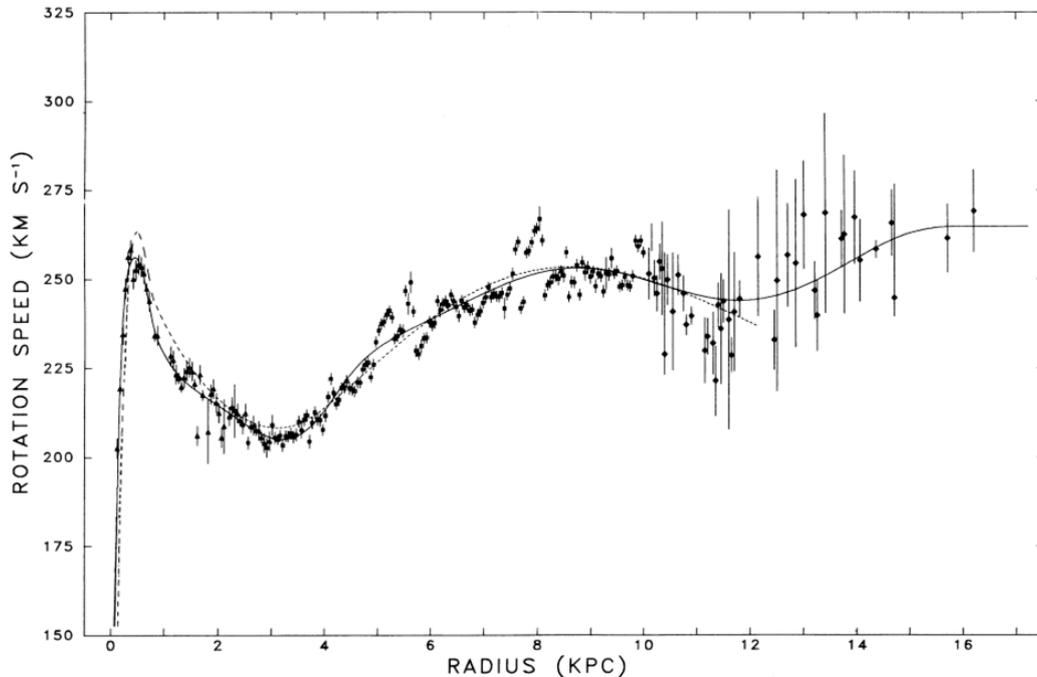
<sup>11</sup>  $\hbar$  è una costante che vale  $h/2\pi$  dove  $h$  è la costante di Planck il cui valore è  $6.6261 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$ .

<sup>12</sup> Il coefficiente di Einstein  $A_{mn}$  è detto *coefficiente di emissione spontanea* e misura la probabilità, per unità di tempo, di passare dal livello elettronico  $m$  al livello elettronico  $n$  con conseguente emissione di un fotone.

Utilizzare HI per studiare la curva di rotazione per  $R > R_0$  è molto più complicato così gli astronomi, in passato, la dedussero in modo alternativo. Derivarono la distribuzione di massa per  $R < R_0$  e poi fecero qualche assunzione su come questa sarebbe continuata per  $R > R_0$  in modo da poter poi ricavare la curva di rotazione. Fu ipotizzato che ci fosse una quantità inferiore di massa fuori dall'orbita del Sole e che dunque la curva di rotazione avrebbe avuto un calo in  $V(R)$  simile a quello che si osserva nei moti Kepleriani.

In realtà, le recenti osservazioni delle *nubi molecolari*<sup>13</sup> hanno fornito un metodo diretto per la determinazione della curva di rotazione fuori dall'orbita solare. Questo da come risultato una curva di rotazione affidabile fino a non meno di 20 kpc.

Il risultato finale, dato dalla combinazione delle curve di rotazione calcolate con HI per  $R < R_0$  e con le nubi molecolari per  $R > R_0$ , è rappresentato nella figura seguente:



**Figura 3.7:** Curva di rotazione della Via Lattea.

Dal grafico vediamo che la curva, invece di tendere a zero a grandi distanze come ci si aspetta in un moto Kepleriano, è sostanzialmente piatta indicando una velocità di rotazione più o meno costante. Se  $V(R)$  è circa costante da 8 a 16 kpc allora la massa  $M$  a 16 kpc è il doppio della massa  $M$  a 8 kpc<sup>14</sup>. Come si spiega questo fenomeno? La luminosità della Galassia decresce rapidamente all'aumentare di  $R$ . Dal momento in cui la parte luminosa della materia è principalmente confinata nel disco, significa che la massa aggiuntiva che mantiene costante la velocità e dunque genera l'appiattimento della curva, si trova da un'altra parte. Si ritiene, come già accennato nel paragrafo 2.3, che questa massa sia confinata nell'Alone della Galassia e che valga circa  $2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ .

Lo studio della curva di rotazione ci permette di avere il primo incontro, seppur indiretto, con la materia oscura: un tipo di materia tutt'ora sconosciuta che non è visibile a nessuna lunghezza d'onda e che quindi non può essere rivelata con gli strumenti attuali ma i cui effetti gravitazionali, al contrario, sono ben visibili.

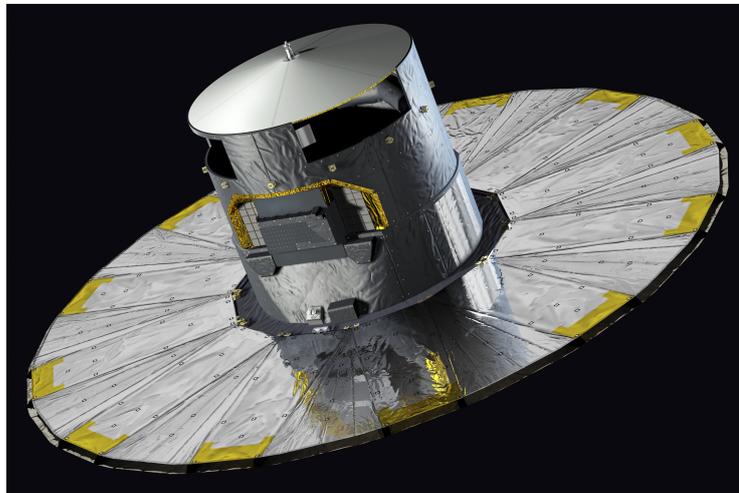
<sup>13</sup> Le emissioni studiate sono quelle delle nubi di monossido di carbonio (CO) associate alle regioni HII.

<sup>14</sup> Questo si vede uguagliando, dal *Il principio della dinamica di Newton*  $F = m a$ , la forza gravitazionale alla accelerazione per il moto circolare:  $\frac{GM(R)m}{R^2} = \frac{mv^2(R)}{R}$ . Risolvendo per  $M(R)$  si ha:  $M(R) = \frac{v^2(R)R}{G}$ .

# Capitolo 4

## La missione spaziale *GAIA*

Il satellite *GAIA* svolge una missione spaziale astrometrica<sup>15</sup> della durata di 5 anni sviluppata dall'*ESA* (*European Space Agency*), continuazione della missione *Hipparcos*<sup>16</sup>, e facente parte del programma scientifico *Horizon 2000*. Il lancio è stato effettuato il 19 dicembre 2013 dalla città di Kourou, nella Guyana francese (America meridionale).



**Figura 4.1:** Un'immagine della sonda spaziale *GAIA*.

### 4.1 Principali obiettivi della missione spaziale

L'obiettivo principale della missione *GAIA* è quello di analizzare più di un miliardo di stelle fuori e dentro la Via Lattea. I dati di questo censimento astronomico permetteranno agli astronomi di rispondere ad alcune domande fondamentali sulla formazione e sull'evoluzione della nostra Galassia.

Qui di seguito sono riportate delle brevissime descrizioni dei principali obiettivi della sonda spaziale:

1. Le stelle nascono dal collasso gravitazionale di nubi di gas che contengono gli elementi chimici raccolti nello spazio. Questi vengono incorporati all'interno delle stelle le quali poi li espellono alla fine del loro ciclo vitale. Questo processo arricchisce il mezzo interstellare con nuovi e più pesanti elementi chimici che vengono incorporati dalle generazioni successive di stelle ricominciando così il ciclo. *GAIA* sarà in grado di distinguere queste diverse generazioni di stelle e quindi di costruire un quadro di come la Galassia è nata e si è successivamente evoluta.
2. Per le stelle che si trovano a circa 150 anni luce dal Sole, *GAIA* cercherà di trovare ogni pianeta delle dimensioni paragonabili a quelle di Giove.

---

<sup>15</sup> L'*astrometria* è il settore dell'astronomia che si occupa della misurazione delle posizioni, delle distanze e dei movimenti delle stelle e di altri corpi celesti.

<sup>16</sup> Missione spaziale iniziata nel 1989 e conclusa nel 1993 dedicata alla misura delle parallassi stellari e dei moti propri delle stelle.

3. Un gran numero di *nane brune*<sup>17</sup> si pensa che vaghi alla deriva nello spazio interstellare. GAIA rileverà decine di migliaia di questi oggetti, indipendentemente dal fatto che essi si trovino in orbita attorno ad altre stelle o a “vagabondare” nello spazio.
4. Grazie alla sua sensibilità senza precedenti nel rilevare oggetti in movimento, GAIA scoperà decine di migliaia di asteroidi, comete e pianeti minori tra i quali, se davvero esiste, il famoso *Pianeta X*, un pianeta la cui esistenza fuori dall’orbita di Plutone è stata ipotizzata da alcuni astronomi ma che ancora non è mai stato trovato<sup>18</sup>.
5. Durante i suoi cinque anni di vita, GAIA rileverà circa  $10^5$  *supernovae*<sup>19</sup> in galassie lontane. I dati raccolti aiuteranno gli scienziati a far maggior chiarezza su questo fenomeno e a calcolare le distanze delle galassie ospitanti.
6. La raccolta dati di GAIA consentirà inoltre di verificare la *Teoria della Relatività Generale* di Einstein come non è mai stato fatto prima. Questo perché la precisione con cui il satellite misurerà le posizioni è talmente alta che gli effetti gravitazionali, solitamente trascurabili, appariranno nei dati.

Il satellite occuperà un’orbita attorno al *secondo punto Lagrangiano* ( $L_2$ )<sup>20</sup> del sistema Sole-Terra che si trova a circa  $1.5 \cdot 10^6$  km dalla Terra nella direzione opposta a quella del Sole. Questo punto offre ottime caratteristiche per l’osservazione dal momento in cui Sole, Terra e Luna non disturbano il campo di osservazione del satellite. Il periodo orbitale sarà di circa 180 giorni e l’operatività del satellite durerà per 5 anni.

La navicella spaziale di GAIA sarà controllata dall’*ESOC* (*European Space Operations Centre*) utilizzando le due stazioni di Cebreros (in Spagna) e Perth (in Australia). Le operazioni scientifiche saranno condotte dall’*ESAC* (*European Space Astronomy Centre*) che si trova a Villafranca, in Spagna.

---

<sup>17</sup> La *nana bruna* è una “stella mancata”. E’ un oggetto che non ha accumulato una massa sufficiente ad innescare la fusione nucleare nel proprio nucleo.

<sup>18</sup> A metà del XIX secolo il pianeta Nettuno era stato trovato dopo che due matematici ne avevano ipotizzato l’esistenza basandosi su delle anomalie osservate nelle orbite di Urano, Saturno e Giove. Delle anomalie simili furono riscontrate anche nell’orbita di questo “nuovo” pianeta e dunque gli astronomi ipotizzarono che fossero dovute ad un altro pianeta ancor più esterno. Quando scoprirono Plutone pensarono di aver svelato il mistero ma la sua massa era troppo piccola per giustificare tali anomalie e dunque si misero alla ricerca di un decimo pianeta: il *Pianeta X*. Tuttavia, in epoca recente, la sonda *Voyager 2* della NASA ha scoperto che la massa di Nettuno era stata calcolata male. Prendendo in considerazione la nuova e corretta massa del “Gigante Blu” si scopre che non c’è più bisogno di nessun decimo pianeta per spiegarne l’orbita. Nonostante ciò, le ricerche di questo misterioso oggetto non sono ancora finite.

<sup>19</sup> Una *supernova* è un’esplosione stellare. Questa può essere innescata in due modi: o tramite la riaccensione improvvisa dei processi di fusione nucleare in una stella degenerare oppure tramite il collasso gravitazionale del nucleo di una stella massiccia che avviene quando i processi di fusione nucleare sono insufficienti a bilanciare la forza di gravità.

<sup>20</sup> Dati tre corpi di massa  $M_1, M_2$  ed  $M_3$  dove  $M_3 \ll M_1, M_2$ , si dicono *punti di Lagrange* quelle posizioni nello spazio in cui le forze che agiscono sull’oggetto minore ( $M_3$ ) si bilanciano, creando una situazione di equilibrio.

## Bibliografia

- [1] Kutner, M. L. (2003), *Astronomy – A Physical Perspective: Second Edition*, Cambridge University Press
- [2] Sparke, L. S., Gallagher, J. S. (2007), *Galaxies In The Universe – An Introduction: Second Edition*, Cambridge University Press
- [3] Binney, J., Merrifield, M. (1998), *Galactic Astronomy*, Princeton University Press
- [4] Fanti, R., Fanti, C. (2012), *Una Finestra Sull’Universo “Invisibile” – Lezioni Di Radioastronomia*, Dispense
- [5] Cimatti, A. (2013-2014), *Our Galaxy*, Dispense

## Sitografia

- [1] <http://sci.esa.int/gaia/>, Sito Web Della Missione Spaziale GAIA